

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Diplomová práce

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Návrh asynchronního trakčního motoru
Design of the traction induction motor

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Adam Rýznar**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh trakčního asynchronního motoru**
Design of The Traction Induction Motor.

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Asynchronní motor v el. trakci.
Elektromagnetický návrh asynchronního trakčního elektromotoru s kotvou nakrátko.
Matematický model navrženého stroje.
Zjednodušená technická dokumentace.
Vícekritériární vyhodnocení navrženého stroje.

Seznam doporučené odborné literatury:


Danzer, J.; Elektrická trakce II - vozidla s asynchronním trakčním motorem, ZČU Plzeň 2001
Pavelka, J. a kol.; Elektrické pohony, ČVUT Praha 2001
Cigánek, L.; Stavba elektrických strojů, SNTL Praha, 1958
Oborové ČSN a EN, katalogové listy použitých aktivních a konstrukčních materiálů.
další dle pokynů vedoucího a konzultanta diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Postřelmově dne 22. 4. 2018


.....

Podpis studenta

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Petru Bernatovi, Ph.D. za cenné rady poskytnuté při sepisování této práce a všem, kteří mi pomohli jejím řešení. V poslední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině, která mě po celý čas studia podporovala.

Abstrakt:

Diplomová práce je zaměřena návrh asynchronního trakčního motoru s kotvou nakrátko a je rozdělena do tří částí. První část se zabývá materiály používanými pro konstrukci elektrických strojů, jako je vinutí, magnetický obvod, izolace atd. Následně pojednává o trakčních motorech, především o asynchronním motoru. Teoretickou část uzavírá uspořádání pohonu a omezení, které se kladou na návrh motoru. Druhou částí je analytický návrh motoru, ve kterém je dojde k určení hlavních rozměrů motoru, drážek, odporů a reaktance, ztrát atd. Poslední částí je simulace navrhnutého motoru v programu Ansys RMxprt a Maxwell 2D, kde dojde k ověření správnosti analytického výpočtu a porovnání simulovaných hodnot pro nemagnetický a magnetický klín.

Klíčová slova:

Asynchronní motor; trakce; návrh; klec nakrátko; stator; rotor; vinutí; elektromagnetický návrh; odpor; reaktance; ztráty; rozběhové charakteristiky; simulace

Abstract:

This diploma thesis focuses on the design of a squirrel-cage asynchronous traction motor and it is divided into three parts. The first part deals with materials used for the construction of electric machines such as the winding, a magnetic circuit, an insulation, etc. Then, it is concerned with traction motors, mainly the asynchronous motor. The theoretical part finishes with the arrangement of the drive and restrictions for the design of the motor. The second part includes an analytical design of the motor in which the main dimensions of the motor, grooves, the resistance and the reactance, losses etc. are determined. The last part is the simulation of the designed motor in Ansys RMxprt and Maxwell 2D softwares which will verify the accuracy of the analytical calculation and the comparison of simulated values for a non-magnetic and magnetic wedge.

Key words:

Induction motor; traction; design; squirrel cage; stator; rotor; winding; design of magnetic circuit; resistance; reactance; losses; start-up diagram; simulation

Obsah:

Obsah:	6
Seznam použitých značek a symbolů	8
Seznam ilustrací	14
Seznam tabulek	14
1 Úvod	16
2 Materiály používané při výrobě elektrických strojů	17
2.1 Magnetický obvod	17
2.2 Vinutí elektrických strojů	18
2.3 Izolační materiály	18
2.4 Konstrukční materiály	19
3 Trakční motor	21
3.1 Typy trakčních motorů	21
3.2 Asynchronní motor	22
3.3 Asynchronní trakční motor	22
3.3.1 Výkon	24
3.3.2 Rychlost otáčení	24
3.3.3 Moment	25
3.3.4 Oteplení	25
3.3.5 Chlazení	26
3.3.6 Trakční charakteristiky	27
3.3.7 Elektrodynamické brzdění	28
3.4 Výrobci asynchronních trakčních motorů	29
3.4.1 Trakční motor ML 3942 K/4	29
3.4.2 Trakční motor ATM 090	30
3.4.3 Trakční motor TAM1084 C6	31
3.4.4 Trakční motor MLU 4245 K/6	31
4 Uspořádání elektrického pohonu	33
4.1.1 Typy pohonu dvojkolí	33
4.1.2 Uložení trakčního motoru	33
4.1.3 Omezení trakčních motorů	34
5 Návrh asynchronního motoru	37

5.1	Zadání.....	37
5.1.1	Návrh statoru.....	37
5.1.2	Vzduchová mezera.....	41
5.1.3	Návrh rotoru.....	41
5.1.4	Elektromagnetický návrh.....	43
5.1.5	Odpory a reaktance	45
5.1.6	Výpočet ztrát.....	50
5.1.7	Rozběhové charakteristiky.....	56
5.1.8	Trakční charakteristiky motoru.....	59
5.1.9	Oteplení.....	60
5.1.10	Pevnostní výpočet hřídele	62
6	Simulace navrženého motoru	64
6.1	Ansys RMxpert	64
6.1.1	Nastavení hodnot	64
6.2	Maxwell 2D.....	67
6.2.1	Stav naprázdno.....	68
6.2.2	Jmenovitý stav	69
6.2.3	Stav nakrátko	71
6.2.4	Magnetická indukce v Maxwell 2D.....	72
7	Závěr	74
8	Citace.....	77
9	Přílohy	79
10	Přílohy na CD.....	99

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Název	Jednotka
$2p$	Počet pólů	-
A	Lineární proudová hustota	$A \cdot m^{-1}$
a	Počet paralelních větví	-
a_{kn}	Výška kruhu nakrátko	m
a_t	Výška tyče nakrátko	m
a_v	Šířka vodiče	m
B	Délka přímé části cívky při výstupu z drážky	m
B_{01}	Amplituda pulsací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubu statoru	T
B_{02}	Amplituda pulsací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubu rotoru	T
$B_{f\delta}$	Fiktivní indukce ve vzduchové mezeře	T
B_{j1}	Indukce ve jhu statoru	T
B_{j2}	Indukce ve jhu rotoru	T
B_{p1}	Amplituda pulsací indukce ve středním průřezu zubu statoru	T
B_{p2}	Amplituda pulsací indukce ve středním průřezu zubu rotoru	T
B_{z1max}	Maximální indukce v zubu statoru	T
B_{z1}	Indukce v zubu statoru	T
B_{z1av}	Střední indukce v zubu statoru	T
B_{z2av}	Střední indukce v zubu rotoru	T
B_{δ}	Indukce ve vzduchové mezeře	T
b_{01}	Otevření statorové drážky	m
b_{02}	Otevření rotorové drážky	m
b'_{01}	Náhradní otevření drážky statoru	m
b'_{02}	Náhradní otevření drážky rotoru	m
b_c	Střední šířka cívky	m
b_{d2}	Šířka rotorové drážky	m
b_{kn}	Šířka kruhu nakrátko	m
b_t	Šířka tyče nakrátko	m
b_v	Výška vodiče	m
b_z	Šířka zubu vodiče	m
b_{γ}	Natočení drážky	m
$\cos \varphi$	Účinník	-
$\cos \varphi_0$	Účinník naprázdno	-
D	Vrtání statoru	m
D_2	Vnější průměr rotoru	m
D_e	Vnější průměr statoru	m
D_i	Vnitřní průměr rotorového svazku/ průměr hřídele	m
D_{kn}	Střední průměr kruhu nakrátko	m
d_{avk1}	Průměr axiálních ventilačních kanálků statorového svazku	-
d_{avk2}	Průměr axiálních ventilačních kanálků rotorového svazku	-
E	Pevnost v tahu	MPa
F	Zatížení hřídele uprostřed rotoru	kg

F_{dav}	Střední celkové magnetické napětí s uvažováním vlivu nasycení	A
F_e	Výstředný magnetický tah	kg
F_m	Výsledné magnetické napětí	A
f_1	Napájecí frekvence	Hz
f_2	Rotorová frekvence	Hz
f_{MAX}	Maximální frekvence	Hz
H_{z1}	Střední intenzita magnetického pole v zubu statoru	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
H_{z2}	Střední intenzita magnetického pole v zubu rotoru	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
h_{02}	Výška otevření rotorové drážky	m
h_{d1}	Hloubka statorové drážky	m
h_{d2}	Hloubka rotorové drážky	m
h_{j1}	Výška jha statoru	m
h_{j2}	Výška jha rotoru	m
h_{j1}'	Předběžná výška jha statoru	m
h_{j1}''	Výška jha statoru pro výpočet indukce ve jhu statoru	m
h_{j2}''	Výška jha rotoru pro výpočet indukce ve jhu rotoru	m
h_r	Hloubka vniku proudu	m
I_0	Proud naprázdno	A
$I_{0\epsilon}$	Činná složka proudu naprázdno	A
$I_{1\epsilon}$	Činná složka proudu	A
I_{0j}	Jalová složka proudu naprázdno	A
I_{1j}	Jalová složka proudu	A
I_1	Proud	A
I_{1N}	Jmenovitý proud	A
I_{kn}	Proud v kruhu nakrátko	A
I_t	Proud v tyči rotoru	A
I_μ	Magnetizační proud	A
i_1	poměrný proud	-
i_μ	Poměrná hodnota magnetizačního proudu	-
K_R	Činitel celkového zvětšení odporu fáze vlivem povrchového jevu	-
k_-	Činitel zvětšení odporu působením povrchového jevu	-
k_B	Činitel tvaru pole	-
k_{c1}	Cartelův činitel pro stator	-
k_{c2}	Cartelův činitel pro rotor	-
k_c	Celkový Cartelův činitel	-
k_E	Poměr indukovaného napětí vinutí statoru ku jmenovitému napětí	-
k_{Fe}	Činitel plnění železa	-
k_i	Činitel uvažující vliv magnetizačního proudu a odporů vinutí	-
k_n	Činitel násobku proudu vlivem nasycení	-
k_r	Činitel rozlohy statorového vinutí	-
k_T	Činitel plnění drážky	-
k_{v1}	Činitel statorového vinutí	-
k_y	Činitel zkrácení kroku	-
k_p	Činitel zvýšení ztrát	-

k_{μ}	Činitel nasycení magnetického obvodu	-
L_{sj1}	Střední délka siločáry ve jhu statoru	m
L_{sj2}	Střední délka siločáry ve jhu rotoru	m
l_{av}	Střední délka závitu statorového vinutí	m
l_c	Celková délka vodičů jedné fáze statorového vinutí	m
l_{ξ}	Délka čela	m
l_{Fe1}	Délka statorového vinutí	m
l_{Fe1}	Délka rotorového svazku	m
l_v	Délka vyložení čel	m
M_N	Jmenovitý moment	N·m
M_{ZVR}	Moment zvratu	N·m
m	Počet fází	-
m	Poměrný moment	-
m_{avk1}	Počet řad axiálních ventilačních kanálků statorového svazku	-
m_{avk2}	Počet řad axiálních ventilačních kanálků rotorového svazku	-
m_{j1}	Hmotnost jha statoru	m
m_r	Celková hmotnost rotoru	kg
m_{rFe}	Hmotnost železa rotoru	kg
m_{rk}	Hmotnost klece nakrátko	kg
m_{z1}	Hmotnost zubů statoru	m
m_{z2}	Hmotnost zubů rotoru	m
N_1	Počet závitů fáze statorového vinutí	-
n_{avk1}	Počet axiálních ventilačních kanálků statorového svazku	-
n_{avk2}	Počet axiálních ventilačních kanálků rotorového svazku	-
n_N	Jmenovité otáčky	min ⁻¹
n_p	Počet větví vodiče	-
n_s	Synchronní otáčky	min ⁻¹
P_2	Výkon na hřídeli	W
P_i	Vnitřní výkon	V·A
P_N	Jmenovitý moment	W
p	Počet pólových dvojic	-
p_i	Činitel přepočtu proudů	-
p_z	Převod mezi statorem a rotorem	-
$p_{\delta p1}$	Hustota povrchových v statoru	W·m ⁻²
$p_{\delta p2}$	Hustota povrchových v rotoru	W·m ⁻²
O_{d1}	Obvod drážky	m
Q_1	Počet drážek statoru	-
Q_2	Počet drážek rotoru	-
Q_v	Požadovaný průtok vzduchu	m ³ ·s ⁻¹
Q'_v	Průtok vzduchu dodávaný vnějším ventilátorem	m ³ ·s ⁻¹
q	Počet drážek na pól a fázi	-
R	Celkový odpor náhradního schématu motoru	Ω
R_1	Odpor fáze statorového vinutí	Ω
R_2	Odpor fáze rotorového vinutí	Ω

R_2'	Odpor fáze rotoru přepočítaný na stator	Ω
$R_{2\xi}'$	Přepočtený odpor fáze rotoru s uvažováním povrchového jevu	Ω
R_1	Odpor statorového vinutí	Ω
R_{kn}	Odpor kruhu nakrátko	Ω
R_t	Odpor rotorové tyče	Ω
r_2'	Poměrný rotorový odpor přepočítaný na stator	Ω
S	Přípustná vzdálenost mezi mědí vodičů sousedních cívek	m
S_{ef}'	Předběžný efektivní průřez	m ²
S_{cv}	Celkový průřez vodičů v drážce	m ²
S_{kn}	Průřez kruhu nakrátko	m ²
S_t	Průřez rotorové tyče	m ²
$S_{t\delta l}$	Ochlazovací plocha	m ²
s	Skluz	-
$s_{před}$	Předběžný skluz	-
s_{pMAX}	Předběžný maximální skluz	-
t_{d1}	Drážková rozteč statoru	m
t_{d2}	Drážková rozteč rotoru	m
t_p	Pólová rozteč	m
U_1	Napětí	V
U_{1N}	Jmenovité napětí	V
U_{j1}	Magnetické napětí jha statoru	A
U_{j2}	Magnetické napětí jha rotoru	A
U_{z1}	Magnetické napětí zubu statoru	A
U_{z2}	Magnetické napětí zubu rotoru	A
U_δ	Magnetické napětí vzduchové mezery	A
V_d	Počet vodičů v drážce	-
V_d'	Předběžný počet vodičů v drážce	-
X	Celková rozptylová reaktance náhradního schématu	Ω
$X_{1\sigma}$	Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí	Ω
$X_{1\sigma n}$	Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí s uvažováním vlivu nasycení	Ω
$X_{1\sigma\gamma}$	Rozptylová reaktance statorového vinutí s uvažováním natočení drážek	Ω
$X_{2\sigma}$	Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí	Ω
$X_{2\sigma}'$	Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí přepočítaná na stator	Ω
$X_{2\sigma\xi}'$	Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí s uvažováním povrchového jevu přepočítaná na stator	Ω
$X_{2\sigma\xi n}'$	Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí s uvažováním vlivu nasycení a povrchového jevu přepočtená na stator	Ω
$X_{2\sigma\gamma}$	Reaktance rotorového vinutí s uvažováním natočení drážek	Ω
y	Krok statorového vinutí	-
y_1	Průhyb z levé strany hřídele	mm
y_2	Průhyb z pravé strany hřídele	mm
y_c	Střední průhyb hřídele	mm
Z	Impedance náhradního schématu	Ω

α	Činitel plnění pólové křivky	-
α	Teplotní součinitel	K ⁻¹
α_1	Součinitel přestupu tepla z povrchu	W·m ⁻² ·K ⁻¹
α_v	Součinitel přestupu tepla uvažující schopnost tělesa odvádět teplo	W·m ⁻² ·K ⁻¹
Δb_{01}	Otevření statorové drážky s uvažováním vlivu nasycení	m
Δb_{02}	Otevření rotorové drážky s uvažováním vlivu nasycení	m
ΔP	Celkové ztráty	W
ΔP_d	Přídavné ztráty	W
ΔP_{dN}	Jmenovité přídavné ztráty	W
ΔP_{Fe}	Celkové ztráty v železe	W
ΔP_{Fed}	Dodatečné ztráty v železe	W
ΔP_{Fehj1}	Ztráty v železe jha statoru	W
ΔP_{Fez1}	Ztráty v železe zubu statoru	W
ΔP_{Feh}	Ztráty v železe statoru	W
ΔP_{j0}	Ztráty naprázdno	W
ΔP_{j1}	Ztráty v statorovém vinutí	W
ΔP_{j2}	Ztráty v kleci rotoru	W
$\Delta P'_{jč1}$	Ztráty v čelech	W
$\Delta P'_{jd1}$	Ztráty v drážkách	W
ΔP_{P1}	Pulsní ztráty v zubech statoru	W
ΔP_{P2}	Pulsní ztráty v zubech rotoru	W
$\Delta P_{\delta P1}$	Povrchové ztráty v statoru	W
$\Delta P_{\delta P1}$	Povrchové ztráty v rotoru	W
ΔP_{MECH}	Mechanické ztráty	W
$\Delta \vartheta$	Oteplení	K
$\Delta \vartheta_1$	Střední oteplení statorového vinutí	K
$\Delta \vartheta_{id1}$	Teplotní spád v drážkové části statorového vinutí	K
$\Delta \vartheta_{jč1}$	Teplotní spád na tloušťce izolace čel	K
$\Delta \vartheta_{pov1}$	Oteplení vnitřního povrchu statorového svazku	K
$\Delta \vartheta_{povč1}$	Oteplení vnějšího povrchu čel izolace	K
$\Delta \vartheta_v$	Oteplení vzduchu uvnitř stroje	K
$\Delta \vartheta'_1$	Střední oteplení statorového vinutí	K
δ	Vzduchová mezera	m
η	Účinnost	-
λ_c	Činitel magnetické vodivosti čel	-
λ_d	Činitel magnetické vodivosti drážky	-
λ_{dif}	Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu	-
ξ	Redukovaná výška vodiče	m
$\Sigma \Delta P'_v$	Celkové ztráty odváděné do vzduchu uvnitř stroje	W
ρ_{20}	Měrný odpor při 20 °C	°C
ρ_{145}	Měrný odpor při 145 °C	°C

ρ_{200}	Měrný odpor při 200 °C	°C
ρ_{Cu}	Měrná hustota mědi	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_{Fe}	Měrná hustota elektrotechnických plechů	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
σ_s	Proudová hustota statorového vinutí	$\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$
σ_{kn}	Proudová hustota rotorové tyče	$\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$
σ_t	Proudová hustota kruhu nakrátko	$\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$
σ_γ	Činitel natočení drážek	-
ϕ	Magnetický tok	Wb

Seznam ilustrací

Obr. 1 Tlapový motor s kluznými ložisky[22].....	21
Obr. 2 Řez asynchronním motorem s kotvou nakrátko malého výkonu [12]	22
Obr. 3 Náhradního schéma a motor pro rychlé změny napětí[7].....	23
Obr. 4 Typy chlazení motoru. (a - cizí; b - vlastní; c - dvouokruhové; d - kapalinové) [7]...	27
Obr. 5 Trakční charakteristika ASM s plynulou regulací[13]	27
Obr. 6 Základní schéma pro brzdění[7]	29
Obr. 7 Trakční motor ML 3942 K/4[15].....	30
Obr. 8 Trakční motor ATM 090[16].....	30
Obr. 9 Trakční motor TAM 1084C6[18]	31
Obr. 10 Trakční motor MLU 4245 K/6[19].....	32
Obr. 11 Uložení motoru[10]	34
Obr. 12 Schématické uspořádání jednoduchého čelního převodu a základní rozměry[9].....	35
Obr. 13 Zvětšení převodu dvoustupňovým převodem a zvětšení centrály třetím kolem[9]..	36
Obr. 14 Rozměry statorové drážky	41
Obr. 15 Drážka rotorové drážky	43
Obr. 16 Rozměry zubu (A - stator, B - rotor)	44
Obr. 17 Redukované náhradní schéma asynchronního stroje[4]	53
Obr. 18 Zatěžovací charakteristiky pro určení jmenovitých hodnot.....	55
Obr. 19 Poměrné hodnoty proudu a momentu.....	59
Obr. 20 Trakční charakteristika motoru.....	60
Obr. 21 B-H charakteristika M330-50A	65
Obr. 22 B-P charakteristika M330-50A.....	65
Obr. 23 Drážka rotoru v RMxprt	66
Obr. 24 Vstupní hodnoty pro simulaci.....	66
Obr. 25 Model motoru v Maxwell 2D	67
Obr. 26 Průběh proudu naprázdno ve statorovém vinutí pro nemagnetické klíny.....	68
Obr. 27 Průběh proudu naprázdno ve statorovém vinutí pro magnetické klíny	68
Obr. 28 Průběh proudu ve vinutí při jmenovitém zatížení pro nemagnetické klíny	69
Obr. 29 Průběh momentu a otáček motoru pro nemagnetické klíny.	70
Obr. 30 Průběh proudu ve vinutí při jmenovitém zatížení pro magnetické klíny.....	70
Obr. 31 Průběh momentu a otáček motoru pro magnetické klíny.	71
Obr. 32 Průběh proudu nakrátko ve statorovém vinutí pro nemagnetické klíny	71
Obr. 33 Průběh proudu nakrátko ve statorovém vinutí pro magnetické klíny	72
Obr. 34 Magnetická indukce pro ustálený stav pro nemagnetický klín.....	72
Obr. 35 Magnetická indukce pro ustálený stav pro magnetický klín.....	73
Obr. 36 Rozložení magnetické indukce v zubu statoru (A - nemagnetický klín; B - magnetický klín).....	73

Seznam tabulek

Tab. 1 Třídy teplené izolace [4].....	19
Tab. 2 Materiály izolace pro třídy tepelné třídy[4].....	19
Tab. 3 Synchronní otáčky asynchronních motorů pro běžné případy[7]	25
Tab. 4 Parametry trakčního motoru ML 3942 K/4[14].....	29

Tab. 5 Parametry trakčního motoru ATM 090[16].....	30
Tab. 6 Parametry trakčního motoru TAM 1084C6[17]	31
Tab. 7 Parametry trakčního motoru MLU 4245 K/6[14].....	31
Tab. 8 Zadané hodnoty	37
Tab. 9 Zvolené a odečtené vstupní hodnoty	38
Tab. 10 Přírůstky pro určení šířky vodiče v mm	40
Tab. 11 Přírůstky na určení hloubky drážky v mm.....	40
Tab. 12 Hodnoty intenzity a indukce v zubu statoru a rotoru.....	43
Tab. 13 jmenovité hodnoty motoru.....	56
Tab. 14 Rozměry pro výpočet průhybu hřídele	62
Tab. 15 Jmenovité hodnoty motoru	66
Tab. 16 Magnetická indukce pro jmenovitý stav	73

1 Úvod

Součástí každodenního života je cestování v jakémkoliv smyslu, ať už do práce, na výlety či poznávat nové věci. Pro tyto účely se v dnešní době může využít hned několik dopravních prostředků a právě jedním takovým prostředkem je vlak.

Vývoj lokomotiv se datuje do roku 1765, kdy došlo k vynálezu prvního parního stroje Jamesem Watem. Roku 1804 byla sestrojena první parní lokomotiva Richardem Trevitheckem, nutno však podotknout že neměla dlouhého trvání. První funkční lokomotiva byla postavena roku 1837 Goergem Stephensonem a její princip je používán doposud. V té době to znamenalo obrovský pokrok, protože vlaky poháněné parními lokomotivami převážely materiál, zásoby a pasažéry na velké vzdálenosti a snižovali tak dobu cestování.[21]

Dalším vývojovým schůdkem byly dieselové lokomotivy poháněné naftovým agregátem. Jejich vznik se datuje do 20. století v Německu a Švýcarsku, bohužel se nikterak nedostali do podvědomí lidí. Jejich nástupcem byla dieselelektrická lokomotiva, která využívá pohonu diesel agregátu a elektrického trakčního motoru. Rozvoj těchto lokomotiv začal v 30. letech ve spojených státech. V těchto letech došlo v Německu na rozvoj dieselhydraulického pohonu. Tyto lokomotivy měly oproti parním lokomotivám řadu výhod např. lepší energetickou náročnost, nižší provozní náklady posádka lokomotivy nemusela stále házet uhlí do kotle a v neposlední řadě rychlejší uvedení do provozu.

S rozvojem společnosti došlo ke vzniku stejnosměrných lokomotiv. Byl to systém, kdy z trolejového vedení se přenášela elektrická energie přes sběrač do strojovny lokomotivy a následně distribuci k trakčním motorům. Jako trakční motor se používal sériový stejnosměrný motor. S příchodem těchto motorů se otevřelo mnoho způsobů uložení motoru a pohonu lokomotivy. Dokonce i v dnešní době se s ním můžeme setkat a to především u pohonu dieselelektrických lokomotiv. Nespornou výhodou sériových stejnosměrných motoru je snadná regulace otáček. Mimo sériové se používaly stejnosměrné motory s cizím buzením.

Dalším schůdkem vývoje pohonu lokomotiv byl asynchronní trakční motor. Tyto motory se začali objevovat až nedávno v pohonech kolejových vozidel, neboť jejich špatná regulace otáček činila největší překážku v užití těchto motoru pro kolejovou dopravu a to bylo dostačující, aby to potlačilo jejich výhody vůči stejnosměrným motorům. Regulace otáček byla odstraněna rozvojem polovodičových prvků.

Ikdyž si to lidé nemusí uvědomovat, jsou trakční motory nedílnou součástí našeho života a jsou na ně kladeny mnohé požadavky, které musí splňovat, aby byly schopné provozu po dobu jejich životnosti.

2 Materiály používané při výrobě elektrických strojů

Dobrý návrh vlastností elektrického stroje, tzn. jeho hospodárný a bezporuchový provoz, nezávisí pouze na elektromagnetickém výpočtu, konstrukci a určení hlavních rozměrů, ale i na volbě materiálu pro jednotlivé části stroje.[3]

Mezi nejdůležitější části návrhu patří výběr materiálu magnetického obvodu, materiálu izolace vinutí a na správné volbě konstrukčního materiálu elektrického stroje, který zaručuje požadovanou mechanickou pevnost jednotlivých částí stroje.[3]

Mechanická pevnost částí stroje nabývá důležitosti při zajištění stroje před poškozením v různých havarijních stavech; například při zkratech, které mají za následek vznik elektromagnetických sil působících mezi jednotlivými cívkami vinutí a mezi vinutím a magnetickým obvodem. Tyto síly můžou poškodit nebo zničit stroj, který nemá dostatečnou mechanickou pevnost.[3]

2.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod elektrického stroje se vyrábí z tenkých ocelových plechů pro elektrotechniku, které jsou vyráběné z nejčistší oceli, z lité oceli nebo z litiny.[2] Mezi základní jakostní charakteristiky plechů patří měrné ztráty, magnetizační křivka, činitel zaplnění, počet ohybů, stárnutí, tloušťka plechu a anizotropie nebo izotropie magnetických vlastností.[6]

Nejrozšířenějším materiálem pro výrobu magnetického obvodu stroje je křemíková ocel. Jedná se o slitinu železa Fe s příměsí křemíku Si. Přidáním křemíku do slitiny se ovlivňují elektrické, mechanické a magnetické vlastnosti. Příměs křemíku do slitiny zvyšuje měrný elektrický odpor a tím zmenšuje ztráty vířivými proudy, zvětšuje permeabilitu, zmenšuje koercivitu a měrné ztráty. Naopak nevýhodou křemíku je horší zpracovatelnost materiálu. Do obsahu křemíku 2,5% se mechanické vlastnosti téměř nemění, ale po překročení této hranice jeho mechanické vlastnosti prudce klesají. Maximální hranice obsahu křemíku leží okolo 4,5% z důvodu křehkosti materiálu.[6]

Další možností změny magnetických vlastností křemíkového plechu je technologie výroby, která ovlivňuje krystalografickou orientaci zrn tzv. texturu a na základě toho můžeme plechy rozdělit do tří typů:[6]

- izotropní, válcované za studena
- izotropní, válcované za tepla
- anizotropní, válcované za studena

Izotropní plechy (neorientované plechy) mají ve všech směrech stejné magnetické vlastnosti a používají se pro točivé stroje. Důležitá je izolace plechu. U válcování za studena se vyznačují hladkým, kovově čistým povrchem a musí se na ně aplikovat izolační vrstva z laku. V případě plechů válcovaných za tepla vznikne na jejich povrchu zoxidovaná vrstva, která slouží jako dostatečná izolace.[6]

Anizotropní plechy (orientované plechy) se vyznačují lepší magnetickou vodivostí v jednom směru než v ostatních směrech, a to ve směru válcování. Tyto vlastnosti vedou ke zmenšení rozměru transformátoru a zvýšení výkonu oproti transformátoru s izotropními plechy.[6]

Magnetické vlastnosti různých typů plechů jsou zobrazeny na magnetizační charakteristice, kterou dodává výrobce a to formou grafu nebo tabulky. Ztráty v železe, tedy ztráty vířivými proudy a hysterezí, určují tzv. měrné ztráty. Měrné ztráty udávají, kolik W se převede na ztráty v 1 kg oceli s

frekvencí 50 Hz a sinusovém napětí. Někteří výrobci udávají magnetizační charakteristiky pro různé frekvence.[4]

Plechys jsou izolované lakem, aby došlo k zmenšení ztrát vířivými proudy. Následkem izolace není celý magnetický obvod magneticky vodivý. Tato skutečnost je respektována tzv. činitelem plnění železa k_{Fe} , který udává poměr průměru složeného svazku bez izolace k celkovému průměru svazku, a může se měnit v závislosti na slisování svazku nebo na tloušťce jednotlivých plechů, případně jejich kombinací.[3]

2.2 Vinutí elektrických strojů

Pro vinutí elektrických strojů se především používá jako materiál měď nebo hliník, které mohou být zpracovány do kruhového nebo pravoúhlého průřezu a jejich typ izolace určuje teplotní třídu.

Nejpoužívanější vodičem pro vinutí je lakovaný měděný vodič kruhového průřezu. Výhodou lakovaného vodiče vůči ostatním typům izolace je tloušťka vrstvy, která je o 1,5 až 2,5krát menší než u vodičů izolovaných lakem, opředěných či opletených bavlnou nebo hedvábím. Lakováním se zvyšuje tepelná vodivost a činitel plnění drážky.[4]

Další možností je použití hliníkového vodiče vyráběného podobně jako vodič měděný, ale jeho průměr začíná od 0,5 mm.[4] Hliník má vůči mědi menší hustotu (hmotnost), která může vést k zmenšení rozměrů stroje, a nižší cenu. Na druhou stranu má hliník třetinovou elektrickou vodivost než měď a musí mít vyšší objem vinutí, což ovlivní rozměry stroje.

Pravoúhlého průřezu vodičů se používá u strojů velkých výkonů. Pravoúhlé vodiče mají zaoblené hrany a mohou se izolovat podobně jako v případě kruhových vodičů. Čtvercový průřez vodičů vinutí není vhodný. Mohlo by docházet ke zkroucení a následným potížím při navíjení vinutí.[4]

2.3 Izolační materiály

K izolaci elektrických strojů se používají pevné, plynné i kapalné materiály, které slouží k izolaci částí elektrických strojů, nacházejících se na rozdílném potenciálu. V případě elektrických strojů se nejčastěji používají pevné izolační materiály.[4]

Fyzikální vlastnosti izolačních materiálů jsou dány tepelnými vlastnostmi daného materiálu. Pokud bude izolační materiál namáhán, dojde k zhoršení jeho elektrických a mechanických vlastností a tedy ke zkrácení doby života. Trvalá tepelná odolnost je vyjádřena maximální přípustnou teplotou, při které nedochází k zrychlenému stárnutí izolace. Podle této vlastnosti se mohou izolace, používané při stavbě elektrických strojů, rozdělit do teplotních tříd uvedených v tabulce 1. Další důležitou vlastností izolace elektrických strojů je měrná tepelná vodivost, která udává schopnost odvádět teplo vznikající ve vinutí stroje.[6]

Tab. 1 Třídy tepelné izolace [4]

Třída izolace	Y	A	E	B	F	H	C
Maximální přípustná teplota (°C)	90	105	120	130	155	180	>180

Základním prvkem pro klasifikaci izolace je tepelná stálost, která udává schopnost izolačního materiálu plnit svoji funkci při provozní teplotě po dobu používání stroje.[4] Může se konstatovat, že izolace hraje nejvýznamnější roli v době životnosti stroje, která se pohybuje okolo 20 let a je právě dána technickým životem izolace.

Tab. 2 Materiály izolace pro třídy tepelné třídy[4]

Třída izolace	Materiál
Y	bavlna, přírodní hedvábí, vlákniny z regenerované celulózy a další materiály odpovídající dané třídě, které nejsou napuštěné a ponořené do tekutého izolantu
A	bavlna, přírodní hedvábí, vlákniny z regenerované celulózy a další materiály odpovídající dané třídě, které jsou napuštěné a ponořené do tekutého izolantu
E	syntetické organické materiály je tvaru vláken nebo tkanin, pryskyřice a kompaundy a další materiály a jejich kombinace odpovídající dané třídě[3]
B	materiály na bázi slídy, azbestu a skelných vláken, s organickými pojidly a další materiály odpovídající dané třídě
F	materiály na bázi slídy, azbestu a skelných vláken se syntetickými pojidly a další materiály odpovídající dané třídě
H	materiály na bázi slídy, azbestu a skelných vláken se silikonovými pojidly a další materiály odpovídající dané třídě
C	slída, křemen, porcelán, sklo, bez pojidel nebo s anorganickými pojidly a další materiály odpovídající dané třídě

Je potřeba zdůraznit, že maximální oteplení izolantů v dané třídě lze využít pouze v případě, kdy je možnost kontrolovat teplotu izolace v místě největší teploty. Za provozních podmínek není možné tuto skutečnost sledovat, a proto jsou v normách pro elektrické stroje uvedeny maximální dovolené teploty cívek a části vedoucí elektrický proud v závislosti na způsobu měření teploty.[3]

2.4 Konstrukční materiály

Kromě materiálů pro vinutí, magnetický obvod a izolaci se v elektrických strojích používají materiály konstrukční, ze kterých se vyrábějí části nesoucí mechanická zatížení a zajišťující spojení stroje v jeden celek. Jako konstrukční materiály se používají železné kovy, barevné kovy a plasty.[4]

Železné kovy jsou nepoužívanější při stavbě elektrických strojů, jako je například ocel na odlitky, temperovaná litina, šedá litina a různé druhy a profily válcované oceli. Ocel na odlitky se používá na výrobu částí stroje, které plní funkci konstrukční části a části magnetického obvodu současně a přes které se uzavírá stejnosměrný magnetický tok. U synchronních strojů s hladkým

rotorem se z oceli na odlitky vyrábí kompletní rotor a u strojů s vyniklými póly se používá na celé magnetické kolo, to znamená na těleso rotoru a póly.[4]

Ocel na odlitky se dále používá pro části, které jsou značně mechanicky namáhány, například pouzdro komutátoru, ložiskových štítů trakčních motorů a strojů v nevýbušném prostředí. Součásti se vyrábí litím, které je velmi obtížné a náročné na technologii.[4]

Z šedé litiny se vyrábí kostry asynchronních a synchronních strojů a ložiskové štíty.

Z temperované litiny se vyrábí kostry, pouzdra, ložiskové štíty, přitlačné prstence, spojky a další. Výhodou temperované litiny je lepší houževnatost a odolnost proti opotřebení.

Válcovaná ocel může být v různém provedení. Pro stavbu elektrických strojů se používá především kruhové šestihranné, čtvercové profily a trubky, plechy a další výrobky. Kruhový profil se používá pro výrobu hřídele, ozubených kol a další. Šestihranné profily se používají k výrobě šroubů, matic a dalších součástí. Čtvercový profil se používá na výrobu žeber, tyčí, nosníků držáků kartáčů a podobných součástí.[4]

Z barevných kovů se ke konstrukčním účelům nejčastěji používá hliník a jeho slitiny s mědí a cínem, ze kterého se zhotovují kostry, ložiskové štíty, ventilátory a další části stroje. Výhodou slitiny hliníku je hmotnost, která je oproti litinovým a ocelovým slitinám menší a lze ji vyrábět progresivnějšími způsoby. Nevýhodou slitiny hliníku je nižší spolehlivost šroubových spojů a to vyžaduje armování ocelovými pouzdry.[4]

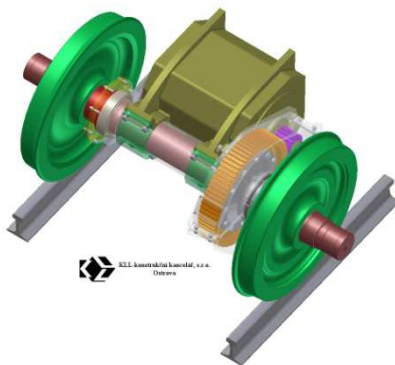
3 Trakční motor

Trakční motor slouží k pohonu dvojkolí kolejových vozidel. Jedná se o elektromotor, který je spojený s dvojkolím přes pevný převodový poměr a je uložený, buď pevně v rámu podvozku, nebo je jednou stranou uložen na nápravě pomocí tzv. tlapového uložení (přes valivá nebo kluzná ložiska) a na druhou stranu je upevněn na rámu podvozku pomocí závěsu. Trakční motory využívají elektrická a dieselelektrická hnací kolejová vozidla a jedná se o elektrický přenos výkonu.[10]

V minulém století se používali komutátorové trakční motory, které měli několik výhod a to snadnou regulaci otáček, záběrného momentu, momentového přetížení, účinnosti, dynamických a regulačních vlastností a spolehlivostí chodu. Nevýhodou komutátorových motorů je kluzný kontakt, který se jeví jako omezující prvek z hlediska proudového zatížení, mechanického opotřebení a většího nároku na údržbu.

Pro moderní kolejová vozidla se zpravidla používá asynchronní motor s klecí nakrátko a individuální pohon dvojkolí. Výhodou těchto motorů je jejich jednoduchost, nenáročnost údržby a po všech stránkách odolnost. Nevýhodou je plynulé a hospodárné řízení otáček motoru. Tato nevýhoda byla odstraněna s vývojem řízených polovodičových prvků např. tranzistory IGBT, tyristory GTO.[8]

V současné době se trakční motory používají i pro elektromobily určené především pro městský provoz, které jsou napájeny z akumulátoru, nebo pro hybridní pohon tvořený elektromotorem a spalovacím motorem.



Obr. 1 Tlapový motor s kluznými ložisky[22]

3.1 Typy trakčních motorů

U elektrických a dieselelektrických hnacích kolejových vozidel se používají následující typy trakčních motorů:

- Stejnosměrný motor s cizím buzením
- Stejnosměrný motor se sériovým buzením
- Asynchronní motor

Nejrozšířenějším motorem je stejnosměrný sériový trakční motor. Výhodou motoru je jeho momentová charakteristika, protože s rostoucím zatížením snižuje otáčky. Navíc rovnoměrně zatěžuje napájecí zdroj a řízení otáček je jednoduché, stačí pouze měnit velikost napětí.

Stejnoseměrný trakční motor s cizím buzením má regulační vlastnosti v trakci podobné jako v jiných pohonech. Podmínkou pro jeho použití je plynule regulovatelný zdroj pro napájení obvodu kotvy a buzení. Tuto podmínku bylo možné použít až po zavedení polovodičových měničů potřebného výkonu, řízených usměrňovačů a pulzních měničů.[8]

Asynchronní motor bude probrán v následujících kapitolách.

3.2 Asynchronní motor

Vynálezcem asynchronního stroje je Nikola Tesla, který ho vynalezl v roce 1883. Asynchronní stroj prošel za 134 let různými fázemi vývoje, kdy došlo k zmenšení rozměrů, měrné hmotnosti a k přesnění metod výpočtů elektrického a magnetického obvodu. Snižování spotřeby materiálu mělo za následek, snižování užitečných vlastností stroje a vliv na spolehlivost a účinnost stroje.[1]

V dnešní době patří asynchronní stroje mezi nejrozšířenější střídavé stroje, které mohou pracovat v režimu motorickém, generátorickém nebo brzdovém. V praxi se nejčastěji používají asynchronní stroje jako motory. Asynchronní motor převádí elektrickou energii na mechanickou. [2]



Obr. 2 Řez asynchronním motorem s kotvou nakrátko malého výkonu [12]

Výkony vyráběných strojů se pohybují od W až po desítky MW. Mezi výhody asynchronního motoru patří jednoduchý a nenáročný nárok na údržbu, poměrně dobrá provozní spolehlivost a malá pořizovací cena.[1]

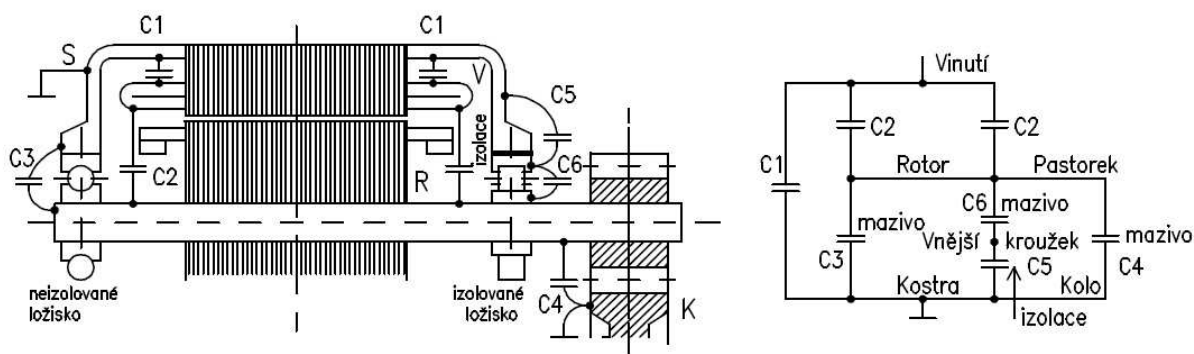
Tyto motory se používají pro pohon dopravníku, elektrické trakce u moderních vozidel, praček, sušiček, ventilátorů apod. Mnohé z aplikací vyžadují nárok na regulaci otáček motoru a omezení proudových nárazů při zapínání motoru. Tuto nevýhodu odstraňují polovodičové měniče, které dokážou při spouštění výrazně omezit proudový ráz a plynule regulovat otáčky motoru.[1]

3.3 Asynchronní trakční motor

Asynchronní trakční motor pomalu nahrazuje stejnosměrné trakční motory používané pro pohony kolejových vozidel. Důvodem této pomalé změny je životnost lokomotiv, která se pohybuje okolo 25 let a v době výroby nebyla možná regulace otáček motoru.

Výhodou asynchronních trakčních motorů proti stejnosměrným jsou menší rozměry, menší hmotnost, nižší cena, větší spolehlivost, odolnost proti provozním vlivům a menší nárok na údržbu. Naopak velkou nevýhodou je potřeba použití pulzního měniče, který zvyšuje cenu pohonu.

Pro pohon kolejových vozidel se používá výhradně třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko napájený z měniče napětí a kmitočtu. Tímto se problematika pohonu přesouvá z trakčního motoru do měniče a řízení neboli stroje. Při používání tranzistorů IGBT se dosahují vysoké napěťové strmosti při spínání. Při hodnotách napěťové strmosti 500 V/ μ s až 5 kV/ μ s se významným způsobem uplatňuje kapacita mezi jednotlivými částmi motoru a uplatňuje se jiné náhradní schéma než u normálních motorů. [7]



Obr. 3 Náhradního schéma a motor pro rychlé změny napětí[7]

Velké strmosti vedou k rychlé degradaci běžně používané izolace a musí se použít speciální izolace např. kapton.[7]

Z náhradního schématu na obr. 3 jsou vytvořené kapacitní děliče mezi vinutím a rotorem, které způsobují vznik napětí na rotoru. Přestože je rotor izolován proti zemi olejovým filmem v ložiscích, tak ve styku zubů převodovky vzniká napětí. Jestliže toto napětí bude překračovat periodicky hodnotu 5 V, bude docházet k opakovaným průrazům izolačního filtru v ložisku, který má za následek degradaci maziva a průběžné poškození ložiska a tudíž snížení životnosti. Velikost ložiskového napětí mezi vinutím a zemí může dosáhnout hodnot 2 - 17%. Motoru, který je napájený přímo z trolejového vedení dosahující napětí až 3 kV, hrozí reálné nebezpečí poškození i při malé vazbě.[7]

Jedním z řešení eliminace ložiskových napětí je použití hybridních ložisek s keramickými valivými tělesy nebo elektrostatické stínění statoru proti rotoru, což však komplikuje výrobu stroje a zvyšuje jeho cenu.[7]

Asynchronní trakční motor se podstatně neliší od běžných motorů pro průmyslové pohony, ale nachází se zde určité rozdíly. Regulace zajišťuje motor pracující pouze ve stabilní části momentové charakteristiky a to znamená, že záběrný moment je bezvýznamný a používá se měděná klec pro snížení ztrát. Reverzace se provádí řízením sledu fází. Nevýhodou je zvýšení ztrát při napájení z měničů. Při použití proudových střídačů dochází ke zvlnění momentu, což je způsobeno odchylkami tvaru proudu od sinusového průběhu.[7]

Motory napájené z proudových střídačů se odlišují i dalšími vlastnostmi jako je například rozptylová indukčnost motoru, která musí být co nejnižší z důvodu akumulované energie při komutaci přenesené do příslušných kondenzátorů, která způsobuje napěťové špičky v závislosti na velikosti a to

vede k prodloužení komutace a omezení pracovního kmitočtu. Další vlastnost je zvlnění momentu motoru, který je nejvýraznější při malých kmitočtech. Řízení pohonu s motory napájenými proudovým zdrojem se blíží k pohonům se stejnosměrnými motory.[7]

Motory napájené z napětových střídačů se odlišují vlastnostmi jako je například rozptylová indukčnost motoru, která by měla být co největší, z důvodů vyhlazení křivky proudu, ale je omezena požadavkem na velikost momentu zvratu při maximálním odbuzení. Další vlastností je zvlnění momentu motoru, které by se mohlo projevit při obdélníkovém napětí, ale až v oblasti od jmenovitého kmitočtu a výše. V této oblasti je kmitočet zvlnění vysoký a prakticky se neuplatní. Je ovšem možné, že se můžou některé části motoru dostat do rezonance s vlastními kmity, například kruhy spojující tyče motoru.[7]

3.3.1 Výkon

Výkon je základním parametrem motoru. U motoru napájeného z měniče jde o výkon trvalý při napájení z použitého měniče, protože způsob vytváření napětí motoru ze stejnosměrného napětí meziobvodu měniče ovlivňuje počet vyšších harmonických a tím ztráty a oteplení. Velikost momentu a výkonu prakticky závisí na velikosti a fázovém posuvu prvních harmonických proudu rotoru a magnetického toku. Proto jsou hodnoty momentů, otáček atd. získané při napájení motoru sinusovým průběhem napětí nebo proudem celkem přesné. Na druhou stranu oteplovací zkoušky a odtud určený skutečný trvalý jmenovitý výkon je nutno určit podle normy ČSN EN 60349-2 Elektrická trakce - Točivé elektrické stroje pro kolejová a silniční vozidla - Část 2: Střídavé motory napájené z elektronických měničů. Oteplovací zkouška při sinusovém průběhu napájení se dá použít pouze pro porovnání s dříve provedenými a podobně využívanými stroji, jinými slovy má orientační charakter.[7]

3.3.2 Rychlost otáčení

Jmenovitá rychlost otáčení motoru odpovídá jmenovitému momentu, výkonu a počtu pólů motoru.

U asynchronních motorů neexistuje omezení odbuzením, ale omezení představuje moment zvratu. Požadovaný moment pro synchronní otáčky motoru je omezen velikostí rozptylových indukčností motoru a je důležitou zadávací veličinou pro návrh motoru.[7]

Z mechanického návrhu motoru jsou synchronní otáčky motoru omezeny ložisky a odstředivými silami, které působí na rotor a při vlastní ventilaci hlukem a mechanickou pevností ventilátoru. Synchronní otáčky jsou dány následujícím vztahem.[7]

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1)$$

U malých a středních výkonů asynchronních motoru používaných pro trakční účely se nejčastěji používají motory čtyřpólové a pro motory velkých výkonů šestipólové. Kmitočet, který odpovídá maximální rychlosti otáčení motoru, obvykle nepřesahuje 200 Hz s ohledem na růst ztrát v magnetickém obvodu, i když je motor silně odbuzován v tomto režimu. Šestipólové motory mají menší rozměr jha, a tedy za jinak stejných poměrů i větší vzduchovou mezeru. Na druhou stranu mají menší počet drážek na pól a fázi vinutí a nižší otáčky pro stejný kmitočet. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty synchronních otáček motoru, které odpovídají uvedeným úvahám. Tučně označené hodnoty přibližně odpovídají nejčastějším případům.[7]

Tab. 3 Synchronní otáčky asynchronních motorů pro běžné případy[7]

f_{MAX} (Hz)	120	150	200
2p=4 (min^{-1})	3600	4000	6000
2p=6 (min^{-1})	2400	3000	4000

Podle dynamické únosnosti a životnosti ložisek lze odvodit maximální dovolené otáčky. Dynamická únosnost ložisek se udává v katalogu výrobce a je závislá na druhu a velikosti ložiska, přesnosti, druhu a materiálu klece, teplotě při provozních podmínkách a mazání.[7]

Jako mazivo se mohou použít různé typy olejů nebo plastické mazivo. Účinek mazání se charakterizuje součinem $n \cdot d_{\text{stř}}$, který se pohybuje pro olej v rozmezí $0,8$ až $3 \cdot 10^6$ ($\text{mm}, \text{min}^{-1}$) a pro plastické mazivo 1 až $1,5 \cdot 10^6$ ($\text{mm}, \text{min}^{-1}$).[7]

Životnost zadává odběratel a pro železniční vozidla se životnost pohybuje v rozmezí 1 až 3 miliony km a pro vozidla MHD v rozmezí $0,6$ až $1,5$ milionu km. Pokud dojde ke změně uvedených podmínek, dochází k výraznému ovlivnění únosnosti a maximálních otáček.[7]

Jelikož je rotor u asynchronního motoru v kompaktním provedení a neobsahuje komutátor, dosahuje zhruba dvojnásobné maximální rychlosti otáček než je tomu u obdobných stejnosměrných motorů. To vyžaduje použití dvojnásobného převodu za jinak stejných poměrů a to v mnoha případech vyžaduje dvojstupňovou převodovku. To znamená, že výsledná hmotnost pohonu s asynchronním motorem je větší o hmotnost převodovky a to snižuje možnou axiální délku motoru. Jestliže je moment od motoru přenášen na dvojkolí přes kloubový hřídel nebo spojku může tento přenos omezit maximální rychlost otáček motoru. [7]

3.3.3 Moment

Moment asynchronního motoru je zásadní pro pohon a moment zvratu je maximálním omezením pro pohon na rozdíl od omezení proudem, neboť závisí na typu chlazení, zda je motor přetěžován či nikoli, anebo na počáteční teplotě. Z toho plyne, že moment je závislý na počtu fází a pólů, výkonu a na napájecím napětí. Pokud je motor napájen konstantním napětím a mění se jeho napájecí frekvence, dochází k poklesu momentu s druhou mocninou napájecího napětí.[7]

Moment zvratu při napájení konstantním napětím klesá s druhou mocninou napájecího kmitočtu a to odpovídá přibližně rychlosti otáčení motoru v odbuzení. V trakčních charakteristikách vozidla se jedná o omezující podmínku. Maximální tažná síla klesá s rychlostí podle hyperboly druhého řádu. Moment, který odpovídá konstantnímu jmenovitému popřípadě maximálnímu výkonu, klesá ve stejné oblasti podle hyperboly prvního řádu, a tudíž vždy existuje průsečík obou průběhů. Toto omezení se projevuje za předpokladu, zda tento průsečík se nachází v oblasti pracovních režimů a to závisí na návrhu.[7]

3.3.4 Oteplení

Každý elektrický stroj se při svém provozu zahřívá, a proto je důležité přizpůsobit izolaci této teplotě. Izolované vinutí se nachází pouze na statoru a musí být dimenzováno na dovolené oteplení stroje. U asynchronních motorů se může teplota měřit v provozu vhodně umístěným čidlem teploty.[7]

Čidlo teploty musí být uloženo izolovaně a z toho vzniká určitá nepřesnost měření teploty. Nejlepší umístění je nejspíše na dně drážky mezi drážkovou izolací a jhem statoru uprostřed délky

statorového svazku. Kdyby se však čidlo ukládalo do tohoto místa, tak by byl problém s vývodem přívodů. Proto se čidlo umísťuje na přístupnější místo, například do vývrtu ve jhu statoru nebo pod bandáž čel statorového vinutí. Výhodou je, že čidlo se dá lehce vyměnit za nové a je kompaktní, ale spolehlivost údajů není příliš dobrá.[7]

Hlavním problémem čidel je nedostatečná životnost v porovnání s motorem. Použitím záložních čidel se tento problém nevyřeší, protože většinou dochází k mechanickému poškození, především přívodu, a to je nezávislé na elektrickém využití.[7]

Měření teploty statoru může sloužit k ochraně motoru proti přehřátí, ale jeho význam je omezený, protože se zásadně používá nejvyšší třída izolace 200. Pokud by bylo možné získat informaci o teplotě rotoru, byla by tato informace velice užitečná, protože by se mohla použít pro korekci parametrů modelu při vektorovém řízení měniče. Oteplení klece rotoru je omezeno na oteplení jiných částí rotoru a to zejména ložisek.[7]

3.3.5 Chlazení

Asynchronní motor se při provozu zahřívá, aby nedošlo k zničení nebo poškození, musí se teplo odvést z oteplujících částí ven. Pokud budeme používat správně navrhnutý motor ve zhoršených podmínkách, které nepřipouštějí dostatečnou výměnu chladicího vzduchu, bude se motor přehřívat stejně jako špatně navrhnutý motor v prostorech s dostatečnou výměnou chladicího vzduchu.[2]

Chlazení asynchronního motoru se může provést více způsoby a to díky jeho jednoduché a robustní konstrukci. Vzhledem k úplné izolaci vinutí nejsou kladeny přísné požadavky na čistotu chladicího vzduchu, který se používá jako nejčastější chladicí médium. Nevýhodou je zvýšení hydraulického odporu a tudíž potřeby většího výkonu ventilátoru.[7]

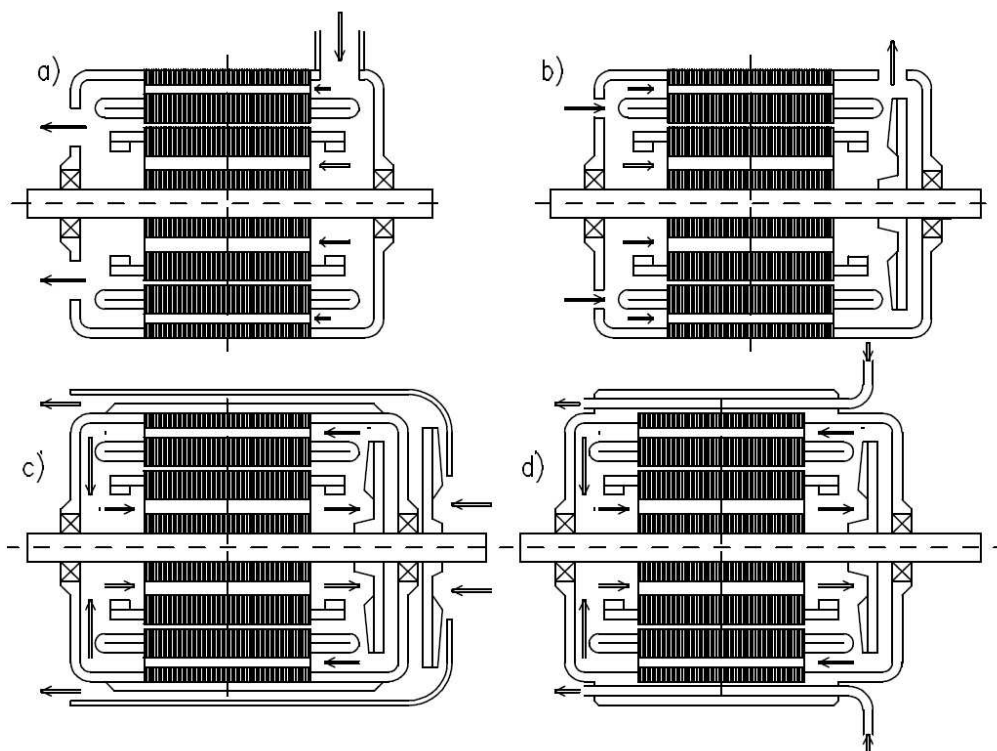
Hlavní typy chlazení jsou zobrazeny na obr. 4.

Motory s cizím chlazením (samostatný ventilátor) se používají pro vozidla s těžkými rozjezdy např. posunovací lokomotivy (obr. 4 a).[7]

Motor s vlastním chlazením (ventilátor na hřídeli) je vhodný pro vozidla, které mají zatěžovací cyklus podstatně menší než jejich oteplovací časovou konstantu např. u tramvají. Je to z toho důvodu, že vlastní chlazení může mít velký rozdíl mezi velikostí ztrát a intenzitou chlazení, protože intenzita chlazení je závislá na otáčkách a velikost ztrát je úměrná kvadrátu proudu (obr. 4 b).[7]

Motor má dva vzduchové obvody, jeden vnitřní uzavřený a druhý vnější otevřený. Na hřídeli jsou umístěny dva ventilátory a stator má dva systémy chladících otvorů. Tento typ chlazení se nazývá chlazení vlastní, dvouokruhové. Pro tento typ chlazení se využívá uzavřených motorů s povrchovým chlazením, které mají velkou oteplovací konstantu. Chladicí vzduch zde nepřichází do styku s vinutím (obr. 4 c).[7]

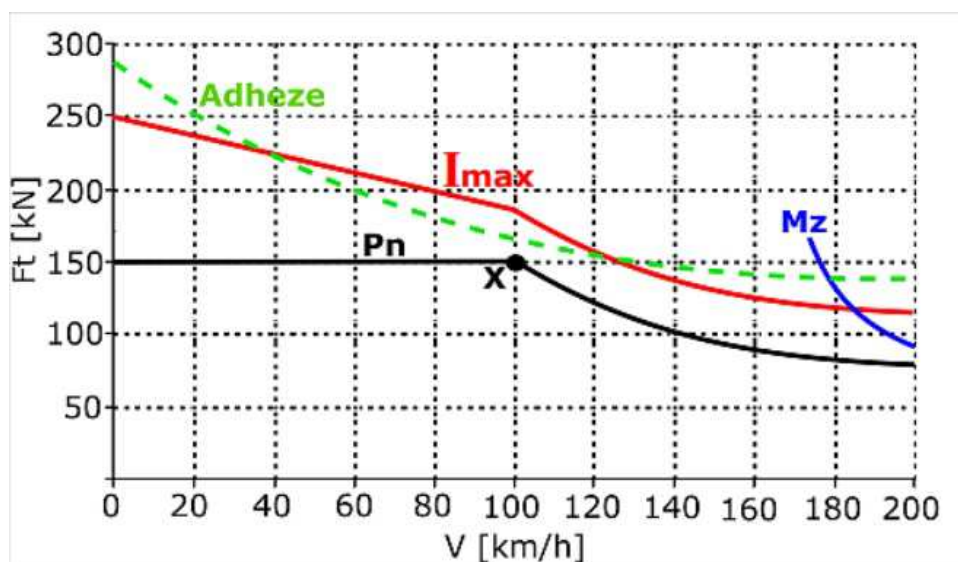
Další možností chlazení motoru je pomocí chladicí kapaliny. Jedná se podobný způsob chlazení jako v předešlém případě, akorát je vnější otevřený chladicí obvod nahrazen uzavřeným kapalinovým obvodem. Výhodou je zlepšení odvodu tepla z motoru a možnost použít společný okruh chlazení pro měnič, který používá jako chladicí médium kapalinu, a motor. Na druhou stranu je potřeba zavedení dalšího chladicího média, čerpadla a chladiče. V tomto případě se jako chladicí médium používá voda s přísadami (obr. 4 d).[7]



Obr. 4 Typy chlazení motoru. (a - cizí; b - vlastní; c - dvouokruhové; d - kapalinové) [7]

3.3.6 Trakční charakteristiky

Momentové charakteristiky motoru odpovídají po přepočtu přes převod, účinnost a průměr kol trakčním charakteristikám. Trakční charakteristika vozidla s asynchronními motory je znázorněna na obr. 5. Jedná se o plynulou regulaci asynchronních motorů a v trakční charakteristice jsou zobrazeny průběhy jmenovitého a maximálního stavu s několika důležitými omezeními.[13]



Obr. 5 Trakční charakteristika ASM s plynulou regulací[13]

Při rozjezdu (přímka do bodu X) se pracuje v oblasti regulace napětí, dle podmínky zachování magnetického toku na konstantní hodnotě, které odpovídá vztahu $\frac{U_1}{f}$ je konstantní s výjimkou nejnižších kmitočtů. Toto umožňuje dosáhnout účinku konstantní tážné síly. Jmenovitá tažná síla F_t a tedy jmenovitý proud motoru I_N odpovídá přímce končící v bodě X, který se nachází v bodě jmenovitých otáček motoru n_N . Maximální moment M_{MAX} v této oblasti je dán maximálním statorovým proudem I_{1s} , který závisí prakticky na hodnotě maximálního proudu I_{MAX} příslušného trakčního střídače a ten může, ale nemusí být v celém odpovídajícím rozsahu kmitočtu konstantní a to vede k omezení tažných sil.[13]

Pokud je potřeba vyšší rychlosti pracuje se v oblasti odbuzení, které vychází z omezení regulace statorového napětí stejnosměrným meziobvodem trakčního střídače napájecího trakčního motor. Smyslem regulace je zvyšování rychlosti otáčení motoru (rychlosti kolejového vozidla) při konstantní hodnotě napájecího napětí U_1 a při zvyšování napájecího kmitočtu f_1 . Na obr. 5 je znázorněno, že zvyšování rychlosti nad jmenovitou rychlost má hyperbolický charakter a to z důvodu zachování konstantního výkonu $P = F_t \cdot V = \text{konst.}$ Při napájení konstantním napětím U_1 klesá moment zvratu a tím nastává omezení tažné síly se čtvercem rychlosti do bodu, kde se protne moment zvratu s výkonovou hyperbolou. Od této rychlosti je maximální moment M_{MAX} omezen momentem zvratu M_{ZVR} , nikoli maximálním proudem měniče I_{MAX} . To se u většiny vozidel projevuje až za maximální hodnotou rychlosti kolejového vozidla.[13]

3.3.7 Elektrodynamické brzdění

Elektrodynamické brzdění je u kolejových vozidel s asynchronními trakčními motory pravidlem a využívá se silových účinků mezi magnetickým polem a vodičem, kterým protéká proud. Nejčastěji se pod tímto pojmem myslí brzdění trakčními motory pracujícími jako generátory poháněné kinetickou energií brzděné soustavy.[11]

Při brzdění s napěťovými střídači se využívá obdobných zapojovacích schémat jako u vozidel s pulzními měniči s meziobvodem. Při brzdění se vždy jedná o rekuperaci do stejnosměrného meziobvodu a střídače s motorem je nutno sledovat jako celek. Trakční motory při brzdění pracují jako asynchronní generátory a napěťový střídač zajišťuje několik funkcí, jako je buzení magnetického pole stroje, usměrňuje a upravuje velikost indukovaného napětí na hodnotu napětí meziobvodu.[7]

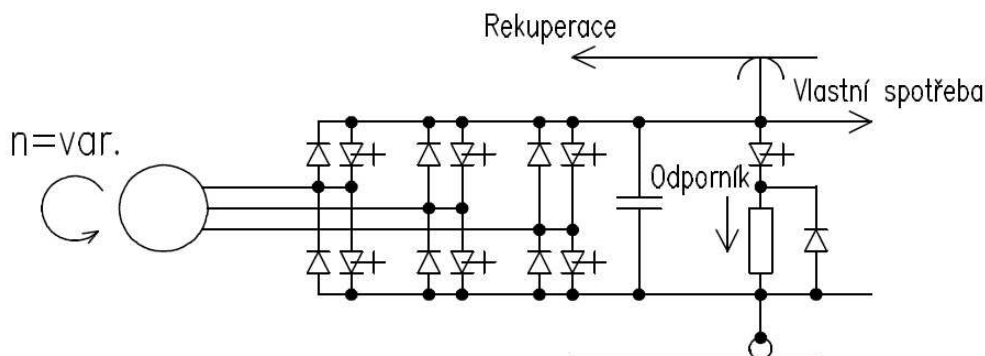
Při tomto způsobu brzdění se zpravidla předpokládá stále jmenovité nebo podle potřeby jiné napětí meziobvodu. S energií generovanou při brzdění do meziobvodu může být naloženo několika způsoby.[7]

- pro napájení pomocných obvodu a vlastní spotřeby vozidla nebo souprav, například ventilátor, kompresor, topení apod.
- maření energie v brzdovém odporníku
- pro buzení samotných trakčních motoru
- rekuperace, tedy dodání generované energie do napájecí sítě přímo nebo přes vstupní měnič, eventuálně transformátor

Nevýhodou u rekuperačního brzdění je velikost generovaného napětí, které musí být větší než napájecí napětí, a frekvence by se měla shodovat s napájecí frekvencí, který by měla být zbavená vyšších harmonických. Pro odstranění vyšších harmonických a získání požadované frekvence se musí

použit složité výkonové elektroniky. Nejideálnější využití rekuperačního brzdění je, když se na trati nachází vlaky a při brzdění jednoho vlaku, který generuje energii, ji druhý spotřebovává při rozjezdu.[11]

Jednotlivé možnosti mohou být různě kombinovány podle požadavků a momentálních okolností.[7]



Obr. 6 Základní schéma pro brzdění[7]

Při brzdění do odporníku je nutno řídit efektivní velikost odporu. Nejčastěji to bývá provedeno pulzním měničem zapojeným do série s odporníkem připojeným na meziobvod. Řízení pulzního měniče může být odvozeno od jeho napětí a to tak, že po překročení určité hodnoty, v důsledku rekuperačního brzdění, které vyrábí větší množství energie než je momentální spotřeba nebo i případně z jiných příčin, se nastaví taková efektivní hodnota odporu, aby byla přebytečná energie spotřebována v odporníku. Odporník a pulzní měnič mohou mít i funkci ochrany proti zvýšení napětí meziobvodu a to i v jiných stavech než při brzdění.[7]

3.4 Výrobci asynchronních trakčních motorů

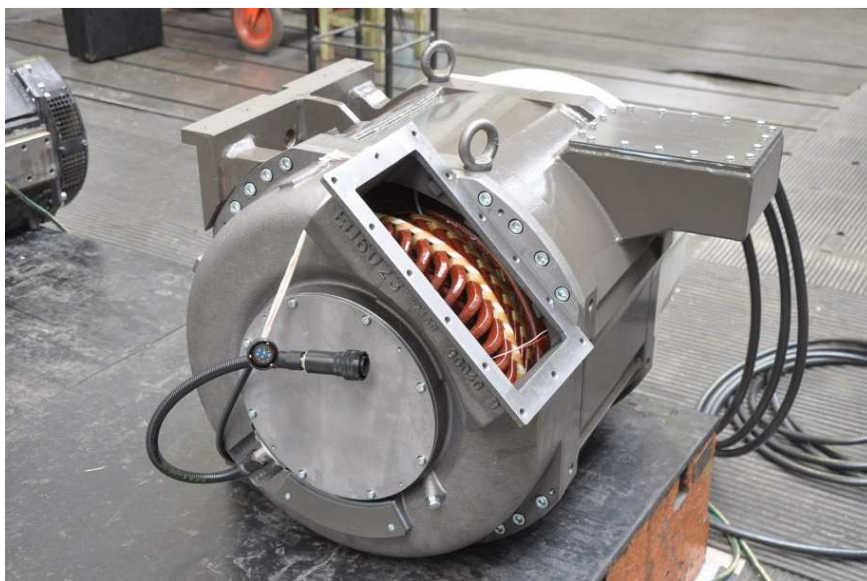
Trakční motory určené pro pohon kolejových hnacích vozidel jsou spíše kusovou záležitostí. Výrobci trakčních asynchronních motorů jsou ŠKODA ELECTRIC a.s, SKD TRADE a.s., Pragoimex a.s. atd. Zde bude uvedeno několik typů trakčních motorů.

3.4.1 Trakční motor ML 3942 K/4

Výrobce motoru je ŠKODA ELECTRIC a.s a je použit například pro individuální pohon dvojkolí příměstské jednotky typu 7Ev neboli ŠKODA Regiopanther. Jedná se o čtyřpólový, otevřený, asynchronní motor s kotvou nakrátko s nuceným chlazením. Přenos točivého momentu je realizován jedním kuželovým hřídelem. Statorové vinutí je impregnováno pod tlakem rozpouštědlovou pryskyřicí neboli VPI (vacuum-pressure-impregnation). To umožňuje mít hodnotu provozní teploty 200 °C a motor se může krátkodobě přetížít maximálně na teplotu 240°C. Trakční motor je konstruován pro zabudování do podvozku kolejového vozidla a je zavěšen pevně v rámu podvozku. Hmotnost trakčního motoru je 755 kg. Parametry trakčního motoru jsou uvedeny v následující tabulce.[14]

Tab. 4 Parametry trakčního motoru ML 3942 K/4[14]

U_N (V)	I_N (A)	P_N (kW)	n_N (min ⁻¹)	n_{MAX} (min ⁻¹)	f_1 (Hz)
1727	142	340	1660	4200	Neznámé



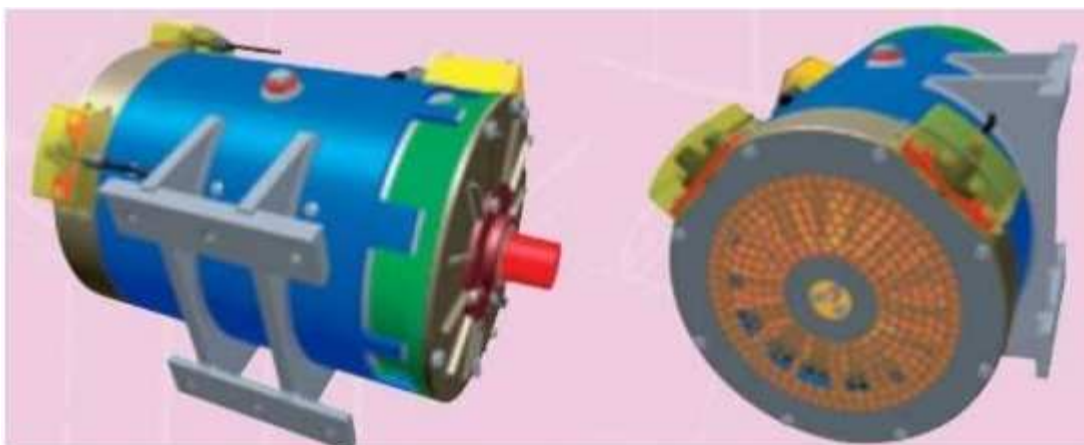
Obr. 7 Trakční motor ML 3942 K/4[15]

3.4.2 Trakční motor ATM 090

Výrobce motoru je SKD TRADE a.s. určený pro pohon dvojkolí tramvajových vozů. Jedná se o asynchronní motor s kotvou nakrátko v uzavřeném provedení. Motor je v čtyřpólovém provedení a 2-ložiskový. Třída izolace vinutí je 200 a motor má vlastní chlazení. Jmenovitá frekvence motoru činí 67 Hz. Trakční motor je projektován a konstruován v souladu s IEC 349. Štít motoru je upraven pro montáž kotoučové nebo bubnové brzdy. Motor může být opatřen jedním až se třemi čidly snímání otáček, záleží pouze na požadavku zákazníka. Hmotnost trakčního motoru je 320 kg.[16]

Tab. 5 Parametry trakčního motoru ATM 090[16]

U_N (V)	I_N (A)	P_N (kW)	n_N (min ⁻¹)	n_{MAX} (min ⁻¹)	f_1 (Hz)
400	153,9	90	1972	4340	100



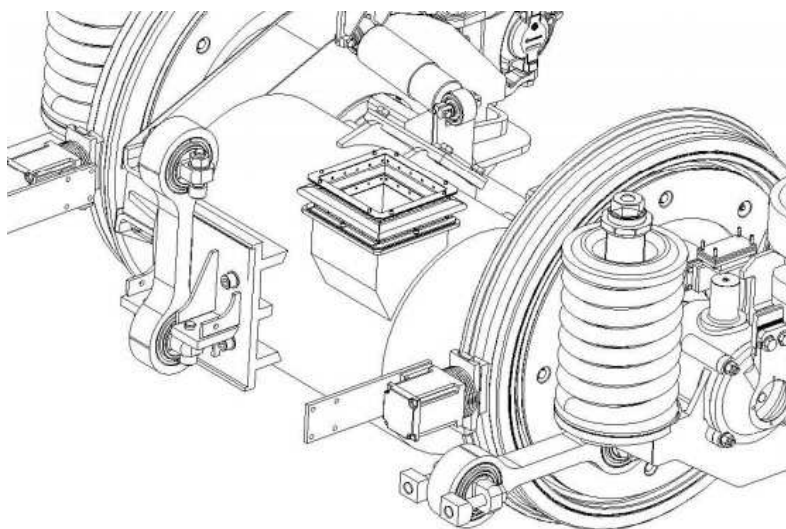
Obr. 8 Trakční motor ATM 090[16]

3.4.3 Trakční motor TAM1084 C6

Výrobce motoru je CZ LOKO a.s. a je určený pro pohon železničních vozidel, jako je například posunovací lokomotiva 719.701 a 744.1. Jedná se o uzavřený šestipólový asynchronní motor s kotvou nakrátko, který je 2-ložiskový v tlapovém provedení s valivými ložisky a má cizí chlazení. Třída izolace vinutí je 200. Přenos točivého momentu je realizován ozubeným převodem. Trakční motor je projektován a konstruován v souladu s IEC 349 a hmotnost trakčního motoru je 1750 kg.[17][18]

Tab. 6 Parametry trakčního motoru TAM 1084C6[17]

U_N (V)	I_N (A)	P_N (kW)	n_N (min ⁻¹)	n_{MAX} (min ⁻¹)	f_1 (Hz)
660	400	366	786	3400	40



Obr. 9 Trakční motor TAM 1084C6[18]

3.4.4 Trakční motor MLU 4245 K/6

Výrobce motoru je ŠKODA ELECTRIC a.s a je například použit pro moderní trakční výzbroj kolejového vozidla EMU 575 určeného pro Litvu.[19] Jedná se o uzavřený, šestipólový asynchronní motor s kotvou nakrátko s vlastním chlazením. Kuželová hřídel je připravena pro montáž se spojkou. Statorové vinutí je impregnováno pod tlakem rozpouštědlovou pryskyřicí neboli VPI (vacuum-pressure-impregnation). To umožňuje mít hodnotu provozní teploty 200 °C a motor se může krátkodobě přetížít na maximální teplotu 240°C. Trakční motor je projektován a konstruován v souladu s IEC 349. Hmotnost trakčního motoru je 1200 kg.[14]

Tab. 7 Parametry trakčního motoru MLU 4245 K/6[14]

U_N (V)	I_N (A)	P_N (kW)	n_N (min ⁻¹)	n_{MAX} (min ⁻¹)	f_1 (Hz)
1130	2x157	500	1986	3975	100



Obr. 10 Trakční motor MLU 4245 K/6[19]

4 Uspořádání elektrického pohonu

Jak už bylo zmíněno výše, tak trakční motory slouží k pohonu dvojkolí. To se děje pomocí převodového zařízení, které může být realizováno ozubenými převody všech druhů umožňující změnu poměru momentu a otáček na momentu a otáček na nápravě s ohledem na použité konstrukční řešení přenosu. Další možností je využití kloubové hřídele a spojky, která umožňuje přenos momentu mezi částmi navzájem se pohybujícími např. při pružení vozidla. Další možností je použití valivých ložisek, které poměrně často rozhodují o životnosti celého zařízení.[9]

Přestože se jedná spíše o mechanickou záležitost a s elektrickými stroji to nemá nic moc společného, tak právě uspořádání pohonu, uložení motoru a způsob přenosu momentu z hřídele na kolo souvisí s požadavky na trakční motory a omezení, které se vyskytují u různých typů uspořádání.[9]

4.1.1 Typy pohonu dvojkolí

Pohon dvojkolí jde realizovat třemi způsoby a to individuálně, skupinově nebo ústředně.

Individuální pohon patří mezi nejrozšířenější způsoby v případě použití elektrického přenosu výkonu. Výhodou je jeho jednoduchost a z toho plynoucí nenáročnost na konstrukční a opravárenské práce oproti ostatním řešením. Je dobré uvést, že o individuálním pohonu hovoříme tehdy, pokud je hnané dvojkolí samostatně bez ohledu na přenos výkonu.[10]

Skupinový pohon má řadu výhod mezi, které patří úspora hmotnosti a počet konstrukčních prvků. U elektrických nebo diesel-elektrických lokomotiv se skupinovým pohonem dochází ke snížení počtu trakčních motorů a zůstává pouze společný trakční motor. Dvojkolí musí být mechanicky vázaná oproti individuálnímu pohonu dvojkolí, z důvodu zlepšení adhezních vlastností podvozků. Nevýhody jsou složité mechanické převody, které mohou zapříčinit zvýšení poruchovosti a opravárenské náročnosti, nemožnost regulace výkonu jednotlivých dvojkolí a výrobní náročnost mechanických částí.[10]

Ústřední pohon je kombinace nápravových převodovek a jejich propojení s kloubovými hřídeli. Všechna dvojkolí jsou torzně kineticky vázána a tento typ pohonu se používá u motorových lokomotiv s diesel-hydraulickým přenosem výkonu.[10]

4.1.2 Uložení trakčního motoru

Uložení trakčního motoru vzhledem k podélné ose se dá provést zásadně třemi způsoby a to

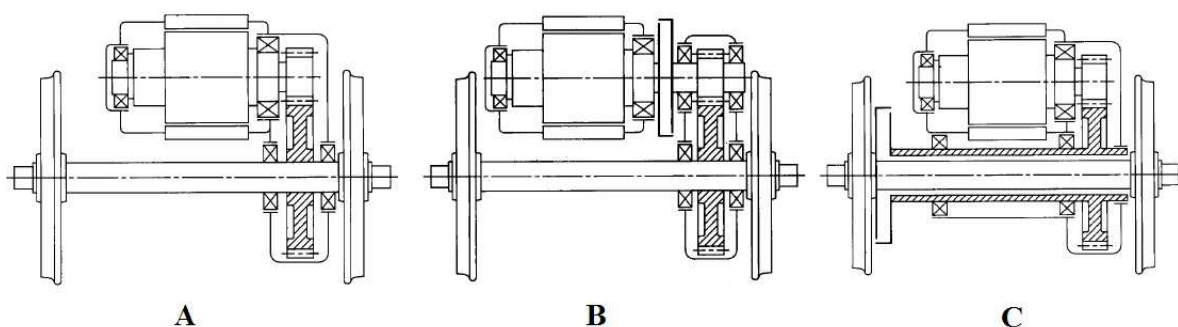
- příčně, kdy osa motoru je rovnoběžná s osou poháněné nápravy a přenos je nejčastěji proveden ozubeným převodem, typickým představitelem tohoto uložení motoru jsou lokomotivy a těžká drážní vozidla[9]
- podélně, kdy osa motoru je kolmá k poháněnému dvojkolí a převod je tvořen kuželovým nebo hypoidním převodem, používané u tramvají, trolejbusů a lehkých regionálních vozidel[9]
- svisle, osa motoru je svislá k poháněnému dvojkolí a pro převod se používá kuželový nebo hypoidní převod, použití u nízkopodlažních tramvají, kdy jsou poháněna samostatná kola, popřípadě skupiny kol na jedné straně vozidla, a ne náprava[9]

Takovým typickým představitelem je tlapově uložený motor s čelním ozubeným převodem. Tlapové motory se používají pro kolejová vozidla s maximální konstrukční rychlostí okolo 100 km/h. Pokud se použije moderního pohonu s lehkým asynchronním motorem, může se dosáhnout i větší rychlosti (až 140 km/h). Motor je uložen třibodově na dvou tlapových (kluzných) ložiscích na nápravě a třetím bodem je uchycen na rám podvozku. Toto uložení nese sebou určité výhody jako je jednoduchost, menší citlivost na relativní pohyby rámu a podvozku, ale na druhou stranu tu jsou i nevýhody mezi, které patří značné nevypružené hmoty (nepříznivé z hlediska vzájemného působení s tratí) a které se pohybují v rozmezí 60% - 80% hmotnosti motoru a provozní náročnost kluzných ložisek (obr. 11 A). [10]

V dnešní době jsou kluzná ložiska nahrazována ložisky valivými s dutým hřídelem, který může být i částečně odpružen proti nápravě. Tímto uspořádáním je dosaženo přesné polohy vůči ose dvojkolí a to znamená přesnější záběr ozubených kol.[10]

Dále tu je provedení s odpruženým dutým hřídelem, které spočívá v uložení trakčního motoru na duté hřídeli objímající nápravu a připojené ke kolům pomocí pryžových prvků (obr. 11 C). Rozdíl oproti výše uvedenému uložení je, že motor není připevněn k rámu podvozku, ale je pevně ložiskován na duté hřídeli a jeho hmotnost spočívá na dvojkolí prostřednictvím hřídele s pružnými členy.[10]

Jinou možností je použití plně odpružené převodovky, která je s motorem spojena pružnou spojkou. Toto uspořádání zmenšuje možnou axiální délku motoru a motor musí být uložen na rámu podvozku (obr. 11 B).[10]



Obr. 11 Uložení motoru[10]

4.1.3 Omezení trakčních motorů

V předchozí kapitole bylo pojednáváno o typech uspořádání elektrického pohonu, které vedou k velké pestrosti řešení pohonu, což má za následek určitá omezení kladená na motor.[9]

Průměr motoru je z největší části závislý na průměru kol, který by měl být co nejmenší a to vede:[9]

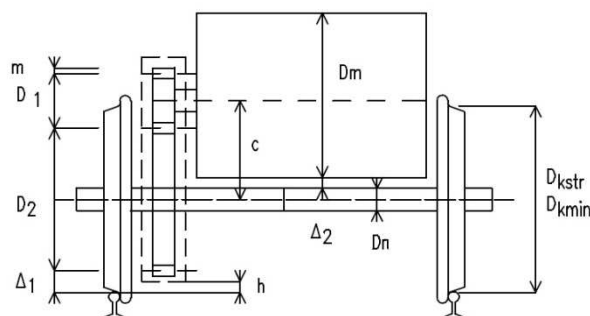
- k snížení hmotnosti neodpružených hmot
- umožňuje vyšší rychlost otáčení motoru za jistých podmínek, které budou uvedeny dále
- zvětšení prostoru ve skříni vozidla, z důvodu možného snížením podlahy

Průměr kol musí odpovídat kolovému zatížení a musí zajistit stabilitu dvojkolí v přímé poloze i při průjezdu obloukem.[9]

U motorů jsou vnější rozměry omezeny především:

- vnější rozměry motoru - u podélného uložení je průměr zpravidla omezen požadavkem na co nejmenší výšku podvozku při daném profilu v prostoru mezi kolejnicemi, u příčného uložení je axiální délka motoru omezena vzdáleností mezi vnitřními plochami kol, která je zmenšená o axiální rozměr spojky, převodu a vůle.[9]
- omezení otáček převodem pro jednotlivá uspořádání pohonu, s daným průměrem kol a požadovanou rychlostí[9]

Jednotlivé body, uvedené výše, se budou sledovat na tlapově uložený motoru s přenosem jedním párem ozubených kol. V dnešní době je snaha zmenšovat rozměry motoru, a aby došlo k zachování stejných poměrů, musí se zvýšit převodový poměr mezi motorem a dvojkolím. To může vést při realizaci k řadě potíží a tyto skutečnosti se musí zohlednit při volbě pohonu. Na obr. 12 je schématicky znázorněno uspořádání pohonu s označením jednotlivých veličin.[9]



Obr. 12 Schématické uspořádání jednoduchého čelního převodu a základní rozměry[9]

Pro roztečný průměr velkého kola platí vztah

$$D_2 \leq D_{k \min} - 2 \Delta_1 \quad (2)$$

Rozměr Δ_1 je vzdálenost mezi roztečnou kružnicí velkého ozubeného kola převodu a temenem kolejnice a skládá se z hodnoty h , která je dána rozměrem vnějšího krytu převodu a temenem kolejnice (pokud je převod v odpruženém provedení, musí se brát v úvahu maximální propružení), nezbytné vůle s ohledem na výrobní nepřesnosti, síly stěny převodovky, prostupu pro mazivo a vzdáleností mezi roztečnou a hlavovou kružnicí.[9]

Pro pastorek platí vztah

$$D_1 \geq m z_{\min} \quad (3)$$

kde z_{\min} je počet zubů s ohledem na záběrové poměry a jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 13 až 17 zubů. Další omezení mohou souviset s konstrukcí převodovky nebo motoru jako je například možnost nalisování pastorku, průměr ložisek, požadavky na montáž a údržbu a další.[9]

Velikost převodu je dána následující rovnicí.

$$i = \frac{D_2}{D_1} \leq \frac{D_{k \min} - 2 \Delta_1}{m z_{\min}} \quad (4)$$

Pokud se bude předpokládat, že maximální rychlost vozidla odpovídá maximálním otáčkám motoru, může se použít vztah[9]

$$\frac{V}{n} = \frac{3,6 \cdot \pi \cdot D_{kst} \cdot \dot{r}}{60 \cdot i} \geq \frac{3,6 \cdot \pi \cdot D_{kst} \cdot \dot{r}}{60} \cdot \frac{mz_{mi}}{D_{kmin} - 2\Delta_1} \geq \frac{3,6 \cdot \pi}{60} \cdot mz_{min} \quad (5)$$

Toto omezení se především uplatňuje u vozidel s nízkou maximální rychlostí a s vysokootáčkovými motory. Použitím dvoustupňového převodu to lze překonat, ale zvýší se hmotnost převodu, ztráty a hlavně se omezí axiální délka trakčního motoru. Za určitých okolností je výhodné použít jednoduchý převod s motorem, který má nižší počet otáček, větší moment a větší rozměr.[9]

Vnější průměr motoru je ve sledovaném případě omezen podle následujícího vztahu.

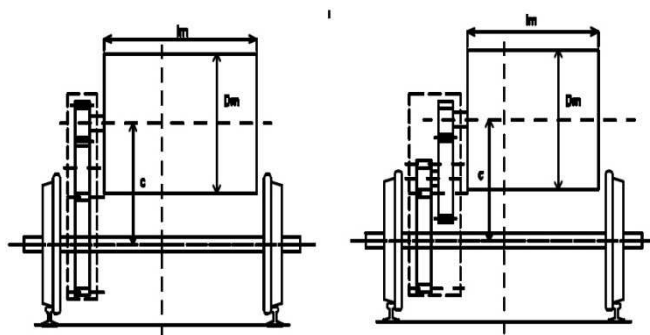
$$D_1 + D_2 = 2c = D_m + D_n + 2\Delta_2 \quad (6)$$

kde Δ_2 je nutná vůle mezi motorem a nápravou a c je takzvaná centrála.[9]

Po úpravě rovnice 6 a vyjádření D_m se dostane vztah

$$D_{min} \leq D_1(1+i) - D_n - 2\Delta_2 \leq D_k(1+i) \quad (7)$$

Z této rovnice je vidět, že průměr motoru závisí na průměru kola a převodu, jehož velikost je omezena. Zvětšení rozměru centrály se dá realizovat vložením třetího kola do převodu, které nemění výslednou velikost převodu, ale zvyšuje rozměry, hmotnost a ztráty převodovky.[9]



Obr. 13 Zvětšení převodu dvoustupňovým převodem a zvětšení centrály třetím kolem[9]

Dalším omezením velikosti pastorku, a tedy dosažitelného převodu, je způsob upevnění pastorku na hřídeli motoru. Zcela běžně se pastorek upevňuje na kužel a to buď, vnitřní nebo vnější. V obou případech musí být zajištěna potřebná tuhost spojení pro přenos momentu.[9]

Dalším prvkem, který představuje omezení maximálních otáček motoru, jsou ložiska. Zcela výhradně se používají valivá ložiska, mazaná olejem nebo tukem. U asynchronních motorů představují jediné místo, které je zapotřebí pravidelně udržívat.[9]

5 Návrh asynchronního motoru

5.1 Zadání

Úkolem diplomové práce je navrhnout asynchronní trakční motor s klecí nakrátko. Před započítáním návrhu se musí ujasnit požadavky na motor jako je například napájecí napětí, výkon, zapojení motoru, chlazení, rozměry, do kterých se musí motor vejít, rychlost otáčení, která souvisí s maximální rychlostí kolejového vozidla a požadovaný moment. V následující tabulce jsou uvedeny zadané hodnoty, které musí motor splňovat.

Tab. 8 Zadané hodnoty

Sdružené napětí	U_{sN} (V)	600
Výkon	P_{2N} (kW)	300
Počet pólů	$2p$ (-)	6
Frekvence	f_1 (Hz)	50
Otáčky	n_s (min^{-1})	1000
Moment	M_s (N·m)	2800
Typ zatížení	-	S1
Třída izolace	-	200
Typ chlazení	-	Cizí
Zapojení	-	Y
Krytí	-	IP 56

Napájecí napětí bude dodáváno trakčním měničem, který slouží pro regulaci otáček a tedy rychlosti kolejového vozidla. Výkon a otáčky motoru jsou voleny s uvažováním požadovaného momentu. V tabulce 8 jsou uvedeny synchronní otáčky a synchronní moment, může se tedy předpokládat, že motor bude mít větší moment než zadaný. Typ provedení motoru bude tlapový s čelním ozubeným převodem a chlazení je provedeno vnějším ventilátorem, který vhání požadovaný objem vzduchu do motoru.

Jedním z nejdůležitějších požadavků jsou rozměry motoru. Jak bylo pojednáno v kapitole 5.1.3, uplatňují se zde omezení, které určují maximální možné rozměry. Tyto rozměry se mohou lišit typem pohonu dvojkolí a umístěním motoru. Po prostudování typů podvozku lokomotiv bylo docíleno závěru, že pro motor budou použity takovéto maximální rozměry: délka 850 mm, šířka 700 a výška 700 mm pro rozchod kolejí 1435 mm.

Součástí návrhu je výkresová dokumentace, která je uvedena v příloze VII, a obsahuje výkres statorového a rotorového svazku, hřídele, statorového vinutí, tyče klece, kruhu klece, přední a zadní ložiskový štít, přední a zadní štít a kostru.

5.1.1 Návrh statoru

Před započítáním návrhu rozměrů statoru se museli odečíst hodnoty účinnosti η , účinníku $\cos\varphi$ a indukce ve vzduchové mezeře B_δ z grafů v knize [4]. Průměr vrtání statoru D spolu s lineární proudovou hustotou A se zvolil a hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce spolu s ostatními hodnotami.

Tab. 9 Zvolené a odečtené vstupní hodnoty

Vrtání statoru	D (m)	0,35
Lineární proudová hustota	A ($A \cdot m^{-1}$)	55000
Činitel plnění pólové křivky	α (-)	0,64
Účinnost	η (-)	0,94
Účinník	$\cos \varphi$ (-)	0,9
Indukce ve vzduchové mezeře	B_δ (T)	0,8

Pro výpočet vnitřního výkonu stroje P_i je nutné odečíst poměr indukovaného napětí vinutí statoru k jmenovitému napětí k_E , který je odečten z obrázku 6.8 v [4] a má hodnotu 0,976.

$$P_i = \frac{P_2 \cdot k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{300 \cdot 0,976}{0,94 \cdot 0,9} = 346,1 \text{ kVA} \quad (8)$$

Pro další výpočty je potřebné znát fázový proud I_{1N} .

$$I_{1N} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_{1N} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 600 \cdot 0,94 \cdot 0,9} = 341,22 \text{ A} \quad (9)$$

Pólová rozteč t_p

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,35}{6} = 0,183 \text{ m} \quad (10)$$

Důležitou součástí návrhu je určení typu vinutí. Voleno bylo dvouvrstvé vinutí s $q = 4$ a krokem $y_d = 10$, který byl zvolen k potlačení vlivu vyšších harmonických a to především páté a sedmé.

Dalším krokem návrhu je zvolení počtu drážek ve statoru $Q_1 = 72$, ze kterých můžeme určit předběžný počet efektivních vodičů v drážce, jelikož jsou známy hodnoty pro jeho výpočet.

$$V_d' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,35 \cdot 55000}{341,22 \cdot 72} = 2,462 \quad (11)$$

Tento výsledek se nezaokrouhluje na celé číslo, ale vynásobí se počtem paralelních větví a , který byl zvolen $a = 3$ a počet efektivních vodičů v drážce V_d je

$$V_d = a \cdot V_d' = 3 \cdot 2,462 = 7,384 \quad (12)$$

Jelikož se jedná o dvouvrstvé vinutí, musí být tato hodnota zaokrouhlena na nejbližší vyšší sudé číslo, které je $V_d = 8$. [4] Při znalosti počtu efektivních vodičů v drážce se může spočítat konečný počet vodičů závitů ve fázi vinutí.

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{8 \cdot 72}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 32 \quad (13)$$

Před určením magnetického toku se musí určit činitel vinutí, který je tvořen dvěma členy a to činitelem rozlohy k_r a činitelem zkrácení kroku k_y . Výpočtové vztahy jsou uvedeny v následujících rovnicích spolu s dosazením.

$$k_r = \frac{0,5}{q \cdot \sin \frac{\pi}{6 \cdot q}} = \frac{0,5}{4 \cdot \sin \frac{\pi}{6 \cdot 4}} = 0,957 \quad (14)$$

$$k_y = \frac{y_d}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{10}{12} \cdot \frac{\pi}{2} = 0,966 \quad (15)$$

Výslední činitel vinutí k_{v1} je

$$k_{v1} = k_r \cdot k_y = 0,957 \cdot 0,966 = 0,924 \quad (16)$$

Při známé hodnotě činitele vinutí k_{v1} se může spočítat hodnota magnetické toku ϕ .

$$\phi = \frac{U_1 \cdot k_E}{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot f \cdot N_1} = \frac{600 \cdot 0,976}{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot 1,11 \cdot 0,924 \cdot 50 \cdot 32} = 0,0514 \text{ Wb} \quad (17)$$

Dalším krokem je určení efektivní délky železa l_{Fe1} .

$$l_{Fe1} = \frac{\phi}{\alpha \cdot t_p \cdot B_\delta} = \frac{0,0514}{0,64 \cdot 0,183 \cdot 0,8} = 0,548 \text{ m} \quad (18)$$

Minimální výška jha statoru h_{j1} se určí z magnetické indukce ve jhu statoru B_{j1} , která se zvolila z tabulky 6.10 v [4] pro drážku typu M a její hodnota činí 1,5 T.

$$h_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot l_{Fe1} \cdot B_{j1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0514}{2 \cdot 0,548 \cdot 1,5 \cdot 0,97} = 0,0322 \text{ m} \quad (19)$$

Tato výška by platila, pokud by ve jhu statoru nebyly axiální ventilační kanály. V tomto případě se nacházejí a výška jha musí být zvýšena, aby hodnota indukce B_{j1} byla zachována kolem hodnoty 1,5 T. Poté je skutečná výška jha $h_{j1} = 0,039 \text{ m}$.

Počet axiálních ventilačních kanálků $n_{avk1} = 72$, které jsou uspořádané v jedné řadě $m_{avk1} = 1$, s průměrem $d_{avk1} = 0,01 \text{ m}$.

Před započítáním určování průřezu se musí zvolit proudová hustota statorového vinutí $\sigma_s = 6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ a vypočte se předběžný efektivní průřez jednoho vodiče drážky S'_{ef} .

$$S'_{ef} = \frac{I_{1N}}{a \cdot \sigma_s} = \frac{341,22}{3 \cdot 6} = 18,957 \text{ mm}^2 \quad (20)$$

Předběžný průřez efektivních vodičů v drážce S'_{cv} je

$$S'_{cv} = S'_{ef} \cdot V_d = 18,957 \cdot 8 = 151,655 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

Před určením rozměrů vodiče vinutí se musí vypočítat minimální šířka zubu rotoru b_{z1min} a otevření drážky b_0 u vzduchové mezery, pro které se potřebuje znám drážková rozteč statoru t_{d1} .

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,35}{72} = 0,0153 \text{ m} \quad (22)$$

Pro výpočet minimálního šířky zubu b_{z1min} se musí určit magnetická indukce v nejužším místě drážky B_{z1max} , která byla zvolena z tabulky 6.10 v [4] pro drážku typu M a její hodnota činí 1,8 T.

$$b_{z1min} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B_{z1max} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,8 \cdot 0,01527}{1,8 \cdot 0,97} = 0,00727 \text{ m} \quad (23)$$

Šířka zubu u vzduchové mezery $b_{z1\min}$ se navýšila o 0,27 mm z důvodu snížení indukce a potom otevření drážky b_{01} je

$$b_0 = t_{d1} - b_{z1\min} = 0,01527 - 0,00727 = 8 \text{ mm} \quad (24)$$

Jelikož je známá šířka otevření drážky b_0 může se určit výška h_k a šířka b_k klínu a výška otevření drážky h_{01} .

Pro určení hloubky statorové drážky h_{d1} se musí nejdříve určit rozměry vodiče, které jsou sníženy o izolaci vodiče, vyložení drážky, vůli, cívkové izolaci, klínem, výškou otevření drážky a mezivložkou a v následujících tabulkách jsou uvedeny jednotlivé přírůstky pro určení šířky a výšky vodiče.

Tab. 10 Přírůstky pro určení šířky vodiče v mm

Izolace vodiče - kapton	0,14
Vyložení drážky	1,16
Cívková izolace	0,34
Vůle	0,36
Celkem	2

Šířka vodiče $a_v = 6 \text{ mm}$ při otevření drážky 8 mm a může se přejít k výpočtu výšky vodiče b_v z efektivního průřezu vodiče a určí se, zda musí být vodič rozdělen na vyšší počet vodičů.

$$b_v = \frac{S_{ef}}{a_v} = \frac{18,957}{6} = 3,16 \text{ mm} \quad (25)$$

Jelikož je průřez přes 17 mm^2 musí se vodič rozdělit na dva a výška jednoho vodiče je 1,7 mm. Následně se určí skutečný průřez vodiče v drážce S_{ef} spolu s proudovou hustotou σ_s .

$$S_{ef} = n_p \cdot a_v \cdot b_v = 2 \cdot 6 \cdot 1,7 = 20,4 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

$$\sigma_s = \frac{I_{1N}}{a \cdot S_{ef}} = \frac{341,22}{3 \cdot 20,4} = 5,575 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (27)$$

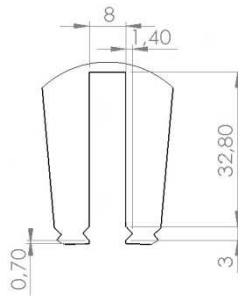
Při znalosti všech rozměrů se může určit hloubka drážky h_{d1} .

Tab. 11 Přírůstky na určení hloubky drážky v mm

Izolace vodiče - kapton	1,68
Vyložení drážky	0,58
Cívková izolace	0,68
Klín	3
Výška otevření drážky	0,7
Mezivložka	1,68
Celkem	8,32

Hloubka drážky statoru činí $h_{d1} = 36,5 \text{ mm}$ a s celkovým počtem vodičů v drážce $V_d = 16$. Činitel plnění drážky je

$$k_T = \frac{S_{cv}}{S_{d1}} = \frac{16 \cdot 1,7 \cdot 6}{8 \cdot 32,8} = 0,622 \quad (28)$$



Obr. 14 Rozměry satorové drážky

Jestliže jsou známy rozměry vnitřního průměru, hloubky drážky a výšky jha, může se určit vnější průměr satoru D_e .

$$D_e = D + 2 \cdot h_{j1} + 2 \cdot h_{d1} = 0,35 + 2 \cdot 0,039 + 2 \cdot 0,0365 = 0,501 \text{ m} \quad (29)$$

5.1.2 Vzduchová mezera

Vzduchová mezera se musí volit s ohledem na účinník, ztráty ve vinutí satoru, povrchové a pulsní ztráty. Vzduchová mezera nesmí být příliš velká, jinak dochází ke snížení účinníku, zvětšení magnetizačního proudu a snížení pulsačních a povrchových ztrát. Naopak při malé velikosti vzduchové mezery vzroste účinník, sníží se magnetizační proud, ale narostou pulsační a povrchové ztráty.[4]

V tomto případě se nejdříve vypočítala předběžná vzduchová mezera δ ze vztahu uvedeného níže.

$$\delta \approx \frac{D}{1,2} \cdot \left(1 + \frac{9}{2p}\right) \cdot 10^{-3} = \frac{0,35}{1,2} \cdot \left(1 + \frac{9}{6}\right) \cdot 10^{-3} = 0,729 \text{ mm} \quad (30)$$

Následně došlo ke zvětšení vzduchové mezery na $\delta = 1 \text{ mm}$ s ohledem na průhyb, který je uveden v pozdější kapitole.

5.1.3 Návrh rotoru

Po určení rozměrů satoru a vzduchové mezery se může určit vnější průřez průměr rotoru D_2 .

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,35 - 2 \cdot 0,001 = 0,348 \text{ m} \quad (31)$$

Délka rotorového svazku l_{Fe2} se uvažuje stejná jako délka satorového svazku $l_{Fe1} = l_{Fe2} = 0,548 \text{ m}$.

Drážková rozteč rotoru t_{d2} závisí na zvoleném počtu drážek Q_2 , bohužel se tento počet nesmí volit náhodně, ale s velkou pozorností. To proto, že pole vzduchové mezery obsahuje nejen základní harmonickou, ale i vyšší, které se indukují do každé tyče. Vyšší harmonické mohou být sníženy natočením drážek, to má však za následek zvýšení reaktancí stroje. Na druhou stranu má natočení příznivý vliv na snížení hladiny hluku a vibrací a do jisté míry potlačuje vyšší harmonické.[4] Pro tento motor se zvolilo $Q_2 = 59$ z tabulky 6.15 v [4] s uvažováním natočení drážek a drážková rozteč t_{d2} je

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,348}{59} = 0,01853 \text{ m} \quad (32)$$

Rotor motoru se skládá v podstatě ze dvou částí, ze železa a klece nakrátko, která je tvořena tyčemi a kruhy nakrátko. Tyče rotorového vinutí nemusí být stejné dlouhé jako rotorový svazek. Uplatňuje se tu vliv natočení a technologický postup výroby při indukčním pájení tyčí na kruh nakrátko. Z toho důvodu došlo ke zvětšení tyče o 11 mm na každé straně.

Jelikož se potřebuje znát průřez tyče S_t a kruhu nakrátko S_{kn} , musí se vypočítat proud procházející jednotlivými částmi. Pro výpočet proudu tyče se musí určit činitel převodu počítaný podle rovnice 34 a činitel k_i , který se určí z grafu 6.22 v [4] a jeho hodnota je 0,93.

$$I_t = k_i \cdot p_i \cdot I_{1N} = 0,93 \cdot 2,994 \cdot 341,22 = 950,077 \text{ A} \quad (33)$$

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 32 \cdot 0,924}{59} = 2,994 \quad (34)$$

Proudu v kruhu nakrátko se vypočítá z následujících rovnic.

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 3}{59} = 0,318 \quad (35)$$

$$I_{kn} = \frac{I_t}{\Delta} = \frac{950,077}{0,318} = 2986,472 \text{ A} \quad (36)$$

Průřez tyče je volen s ohledem na proudovou hustotu v tyči $\sigma_t = 6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$.

$$S_t = \frac{I_t}{\sigma_t} = \frac{950,077}{6} = 158,346 \text{ mm}^2 \quad (37)$$

Pro určení průřezu kruhu nakrátko se snižuje proudová hustota σ_{kn} o 15-20% z σ_t z důvodu lepšího ochlazování kruhu.[4] Proto byla proudová hustota σ_{kn} zvolena $5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$.

$$S_{kn} = \frac{I_{kn}}{\sigma_{kn}} = \frac{2986,472}{5} = 597,294 \text{ mm}^2 \quad (38)$$

Před určením šířky b_{kn} a výšky a_{kn} se musí zvolit typ drážky a vypočítat minimální šířka zubu, která se spočítá z maximální indukce v zubu rotoru $B_{z2\max} = 1,7 \text{ T}$ a je odečtena z tab. 6.10 v [4]. Drážka je obdélníkového průřezu s otevřením $b_{02} = 2 \text{ mm}$ a výška otevření $h_{02} = 2,5 \text{ mm}$. Pro zjištění šířky rotorové drážky se musí vypočítat minimální šířka zubu $b_{z2\min}$ z následující rovnice.

$$b_{z2\min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2}}{B_{z2\max} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,8 \cdot 0,01853}{1,7 \cdot 0,97} = 0,009 \text{ m} \quad (39)$$

Po zjištění minimální šířky zubu se může určit šířka drážky. Jelikož se jedná o drážky obdélníkového průřezu, musí se přizpůsobit hloubka drážky h_{d2} tak aby šířka zubu nebyla pod hodnotou $b_{z2\min}$. Tomu nejlépe odpovídá hloubka drážky $h_{d2} = 34 \text{ mm}$ a šířka drážky $b_{d2} = 5,5 \text{ mm}$. Drážka rotoru je znázorněna na obr. 15.

Při znalostech rozměrů rotorové drážky se můžou zvolit rozměry tyče, které budou menší o šířku izolace a technologický postup výroby. Výška tyče $a_t = 33,8 \text{ mm}$ a šířka tyče $b_t = 5,3 \text{ mm}$.

Předposlední co zbývá určit, jsou rozměry kruhu nakrátko a_{kn} a b_{kn} , které se určují podle následujících rovnic.

$$a_{kn} = 1,12 \cdot (h_{d2} + h_{02}) = 1,12 \cdot (34 + 2,5) = 40,88 \approx 41 \text{ mm} \quad (40)$$

$$b_{kn} = \frac{S_{kn}}{a_{kn}} = \frac{597,294}{41} = 14,568 \approx 15 \text{ mm} \quad (41)$$

Poté je vnitřní průměr kruhu nakrátko D_{kn} následující

$$D_{kn} = D_2 - a_{kn} = 0,348 - 0,041 = 0,307 \text{ m} \quad (42)$$

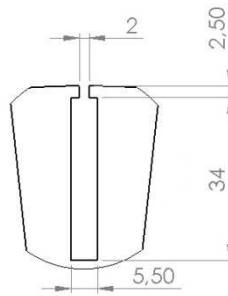
Poslední na určení je vnitřní průměr rotoru, který je dán průměrem hřídele. Pro jeho výpočet se odečte z tabulky 6.16 v [4] činitel $k_h = 0,23$ a následně se vypočte průměr hřídele D_i' podle následující rovnice.

$$D_i' = k_h \cdot D_e = 0,23 \cdot 0,501 = 0,115 \text{ m} \quad (43)$$

V rámci zajištění dovoleného průhybu se tento vnitřní průměr zvětšil na $D_i = 0,12 \text{ m}$.

Výška jha rotoru h_{j2} je dána vztahem 44. I tady se nacházejí axiální ventilační kanálky. Jejich počet $n_{avk2} = 8$ v jedné řadě $m_{vk2} = 1$ a průměr je $d_{avk2} = 0,04 \text{ m}$.

$$h_{j2} = D_2 - h_{d2} - h_{o2} - D_i = \frac{0,348}{2} - 0,034 - 0,0025 - \frac{0,12}{2} = 0,0775 \text{ m} \quad (44)$$



Obr. 15 Drážka rotorové drážky

5.1.4 Elektromagnetický návrh

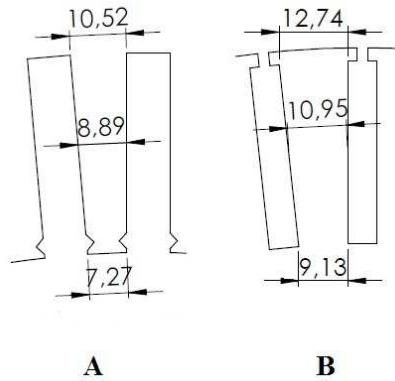
Při začátku výpočtu elektromagnetického obvodu se musí nejdříve určit indukce v jednotlivých částech, jako jsou jha a zuby statoru a rotoru.

Indukce v zubech B_z se spočítá podle následující rovnice a hodnoty jsou zapsány v tabulce 12 spolu s šířkami, které jsou znázorněny na obr. 16. Po výpočtu indukce se zvolil materiál plechů od firmy ThyssenKrupp M330-50A a odečtou se hodnoty intenzity H k příslušným indukčním B z přílohy I.

$$B_z = \frac{B_\delta \cdot t_d}{b_z \cdot k_{Fe}} \quad (45)$$

Tab. 12 Hodnoty intenzity a indukce v zubu statoru a rotoru

	b_z (mm)	B_z (T)	H_z (A/m)
B_{z1max}	7,27	1,732	8000
B_{z1pul}	8,89	1,341	400
B_{z1min}	10,52	1,205	193
B_{z2max}	9,13	1,665	6000
B_{z2pul}	10,95	1,390	620
B_{z2min}	12,76	1,193	192



Obr. 16 Rozměry zubu (A - stator, B - rotor)

Střední intenzita v zubu statoru a rotoru se vypočítá pomocí Simpsonova pravidla.

$$H_{z1} = \frac{1}{6} \cdot (H_{z1 \max} + 4 \cdot H_{z1 \text{ pul}} + H_{z1 \min}) = \frac{1}{6} \cdot (8000 + 4 \cdot 400 + 220) = 1632,167 \text{ A/m} \quad (46)$$

$$H_{z2} = \frac{1}{6} \cdot (H_{z2 \max} + 4 \cdot H_{z2 \text{ pul}} + H_{z2 \min}) = \frac{1}{6} \cdot (6000 + 4 \cdot 620 + 192) = 1445,33 \text{ A/m} \quad (47)$$

Výška zubu h_{z1} je stejná jako výška drážky h_{d1}

Ted' se musí určit indukce ve jhu statoru a rotoru s uvažováním axiálních ventilačních kanálků, ale před tímto výpočtem se musí určit výška jha statoru h_{j1}'' a rotoru h_{j2}'' s uvažováním axiálních ventilačních kanálků.

$$h_{j1}'' = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} - \frac{2}{3} \cdot m_{vk1} \cdot d_{vk1} = \frac{0,501 - 0,35}{2} - 0,0365 - \frac{2}{3} \cdot 1 \cdot 0,1 = 0,0323 \text{ m} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} h_{j2}'' &= \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} - \frac{2}{3} \cdot m_{vk2} \cdot d_{vk2} = \\ &= \frac{0,348 - 0,12}{2} - 0,0365 - \frac{2}{3} \cdot 1 \cdot 0,4 = 0,05083 \text{ m} \end{aligned} \quad (49)$$

Následně se určí indukce ve jhu statoru B_{j1} a rotoru B_{j2} .

$$B_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot h_{j1}'' \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0514}{2 \cdot 0,0323 \cdot 0,548 \cdot 0,97} = 1,495 \text{ T} \quad (50)$$

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2 \cdot h_{j2}'' \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0514}{2 \cdot 0,05083 \cdot 0,548 \cdot 0,97} = 0,951 \text{ T} \quad (51)$$

Intenzita H_{j1} pro indukci ve jhu statoru B_{j1} je 1930 A/m a intenzita H_{j2} pro indukci ve jhu rotoru B_{j2} je 81 A/m.

Pro výpočet magnetického napětí ve jhu statoru U_{j1} a rotoru U_{j2} potřebujeme znát střední délku siločáry L_{sj} . Délka siločáry u zubů L_z je rovna výšce drážky h_d .

$$L_{sj1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,501 - 0,0365)}{6} = 0,2419 \text{ m} \quad (52)$$

$$L_{sj2} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{j2})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,348 - 0,0775)}{6} = 0,1034 \text{ m} \quad (53)$$

Magnetické napětí ve jhu statoru U_{j1} a rotoru U_{j2} je

$$U_{j1} = H_{j1} \cdot L_{sj1} = 1930 \cdot 0,2419 = 466,872 \text{ A} \quad (54)$$

$$U_{j2} = H_{j2} \cdot L_{sj2} = 81 \cdot 0,1034 = 8,376 \text{ A} \quad (55)$$

Magnetické napětí v zubu statoru U_{z1} a rotoru U_{z2} je

$$U_{z1} = 2 \cdot h_{d1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,0365 \cdot 1632,167 = 119,148 \text{ A} \quad (56)$$

$$U_{z2} = 2 \cdot h_{d2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,0365 \cdot 1445,33 = 105,509 \text{ A} \quad (57)$$

Poslední magnetické napětí je ve vzduchové mezeře U_{δ} , pro které se musí vypočítat Carterův činitel k_c .

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} + \delta - 0,75 \cdot b_{01}} = \frac{0,01527}{0,01527 + 0,001 - 0,75 \cdot 0,008} = 1,487 \quad (58)$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} + \delta - 0,75 \cdot b_{02}} = \frac{0,01853}{0,01853 + 0,001 - 0,75 \cdot 0,002} = 1,028 \quad (59)$$

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2} = 1,487 \cdot 1,028 = 1,528 \quad (60)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře U_{δ} je

$$U_{\delta} = 1,56 \cdot 10^{-6} \cdot B_{\delta} \cdot k_c \cdot \delta = 1,56 \cdot 10^{-6} \cdot 0,8 \cdot 1,528 \cdot 0,001 = 1945,417 \text{ A} \quad (61)$$

Výsledné magnetické napětí F_m na jednu pólovou dvojici.

$$F_m = U_{\delta} + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = 1945,417 + 119,148 + 105,509 + 466,872 + 8,376 = 2645,323 \text{ A} \quad (62)$$

Činitel syčení k_{μ}

$$k_{\mu} = \frac{F_m}{U_{\delta}} = \frac{2645,323}{1945,417} = 1,359 \quad (63)$$

Magnetizační proud I_{μ}

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{3 \cdot 2645,323}{0,9 \cdot 3 \cdot 32 \cdot 0,924} = 99,838 \text{ A} \quad (64)$$

Poměrná hodnota magnetizačního proudu i_{μ}

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{1N}} = \frac{99,838}{341,22} = 0,292 \quad (65)$$

5.1.5 Odpor a reaktance

Odpor statorového vinutí R_1 se vypočítá podle rovnice 75. Před určením jeho hodnoty se musí vypočítat délka vinutí l_c , měrná rezistivita vinutí ρ_{Cu} pro oteplení použité teplotní třídy a činitel zvětšení odporu vlivem povrchového jevu k_{∞} , který je respektován až v přídatných ztrátách a pro výpočet odporu statorového vinutí se bude uvažovat 1.[4]

Měrná rezistivita statorového vinutí je $\rho_{20} = 1,724 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ pro $20^\circ C$, která se musí přepočítat na pracovní teplotu, která činí $145^\circ C$. Maximální teplota pro použitou teplotní třídu 200 je

200 °C. S touto teplotou bude uvažováno až při výpočtu předběžného oteplení v kapitole 6.1.9. Oteplení při výpočtu odporu se uvažuje $\Delta v = 125$ °C.

$$\rho_{145} = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta v) = 1,724 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,004 \cdot 125) = 2,586 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \quad (66)$$

kde α je teplotní součinitel elektrického odporu pro měď a jeho hodnota je 0,004

Pro určení celkové délky jedné fáze vinutí se musí určit činitele m , K_ε a K_v .

$$m = \frac{b + S}{t_{d1}} = \frac{0,006 + 0,0035}{0,01527} = 0,622 \quad (67)$$

kde hodnota S je přípustná vzdálenost mezi mědi vodičů sousedních cívek určená z tabulky 6.20 v [4]

$$K_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,622^2}} = 1,277 \quad (68)$$

$$K_v = \frac{1}{2} \cdot K_\varepsilon \cdot m = \frac{1}{2} \cdot 1,277 \cdot 0,622 = 0,397 \quad (69)$$

Pro výpočet délky čela l_ε a vyložení čel l_v se musí vypočítat střední šířka cívky b_c podle následující rovnice.

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D + h_{d1})}{2p} \cdot \beta_1 = \frac{\pi \cdot (0,35 + 0,0365)}{6} \cdot 0,833 = 0,1686 \text{ m} \quad (70)$$

Potom je délka čela l_ε a vyložení čel l_v

$$l_\varepsilon = K_\varepsilon \cdot b_c + 2 \cdot B + h_{d1} = 1,277 \cdot 0,1686 + 2 \cdot 0,025 + 0,0365 = 0,302 \text{ m} \quad (71)$$

$$l_v = K_v \cdot b_c + B - 0,5 \cdot h_{d1} = 0,397 \cdot 0,1686 + 0,025 + 0,5 \cdot 0,0372 = 0,0737 \text{ m} \quad (72)$$

kde B je délka přímé části cívky při výstupu z drážky od čela statorového svazku do ohybu čela určená z tabulky 6.20 v [4]

Střední délka závitu l_{av} je dána délkou statorového svazku l_{Fe1} a délkou čel l_ε

$$l_{av} = 2 \cdot (l_{fe1} + l_\varepsilon) = 2 \cdot (0,548 + 0,302) = 1,699 \text{ m} \quad (73)$$

a celková délka jedné fáze vinutí je dána následující rovnicí.

$$l_c = l_{av} \cdot N_1 = 1,699 \cdot 32 = 54,394 \text{ m} \quad (74)$$

Ted' jsou známy všechny veličiny pro výpočet odporu jedné fáze statorového vinutí, které je tvořeno 8 dílčími vodiči, a jejich rozměry byly uvedeny v kapitole 6.1.2.

$$R_1 = k_- \cdot \rho_{145} \cdot \frac{l_c}{8 \cdot \frac{S_{ef}}{2}} = 1 \cdot 2,586 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{54,394}{8 \cdot \frac{20,4 \cdot 10^{-6}}{2}} = 0,01793 \Omega \quad (75)$$

Po určení odporu statorového vinutí se může přejít na výpočet odporu klece nakrátko, která se skládá ze dvou částí a to z odporu tyče R_t a kruhu R_{kn} . Jedná fáze rotoru je tvořena tyčí a dvěma částmi kruhu. Materiálem klece je měď.

Odpor tyče R_t

$$R_t = \rho_{145} \cdot \frac{l_t}{S_t} = 2,586 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,570}{0,0053 \cdot 0,0338} = 8,558 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (76)$$

Odpor kruhu R_{kn}

$$R_{kn} = \rho_{145} \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = 2,586 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0,307}{59 \cdot 6,15 \cdot 10^{-4}} = 7,149 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (77)$$

Výsledný odpor R_2 je dán součtem těchto dvou odporů.

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 8,558 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot \frac{7,149 \cdot 10^{-7}}{0,318^2} = 9,971 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (78)$$

Přepočet výsledného odpor R_2 na stator bude proveden v poslední části této kapitoly spolu s ostatními přepočty.

Po určení odporů se může přejít na výpočet reaktancí. Jako první se určí reaktance statorového vinutí $X_{\sigma 1}$. Reaktance závisí na typu a rozměrech drážky a vypočítá se podle rovnice 85, u které se musí určit činitel magnetické vodivosti rozptylu čel λ_{c1} , vodivosti drážky λ_{d1} a vodivosti diferenčního rozptylu pro statorové vinutí λ_{dif1} . Každý z těchto činitelů obsahuje různé činitele, které jsou potřebné pro výpočet.

Jako první se vypočítá činitel magnetické vodivosti drážky λ_{d1} a pro její určení je potřeba vypočítat činitele k'_β a k_β z následujících rovnic.

$$k'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,833) = 0,875 \quad (79)$$

$$k_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot k'_\beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,875) = 0,906 \quad (80)$$

Pro činitel magnetické vodivosti statorové drážky λ_{d1} se použít vztah z tabulky 6.22 pro drážku na obr. 6.38a v [4].

Činitel magnetické vodivosti drážky λ_{d1} potom je

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \frac{h_2 - h_m}{3 \cdot b_d} \cdot k_\beta + \frac{h_1}{b_d} \cdot k'_\beta + \frac{h_m}{4 \cdot b_d} = \\ &= \frac{32,53 - 0,58}{3 \cdot 8} \cdot 0,906 + \frac{3,7}{8} \cdot 0,875 + \frac{0,58}{4 \cdot 8} = 1,622 \end{aligned} \quad (81)$$

Pro určení činitele magnetické vodivosti rozptylu čel λ_{c1} je všechno známé a vypočítá se podle následujícího vztahu.

$$\begin{aligned} \lambda_{c1} &= 0,34 \cdot \frac{q}{l_{Fe1}} \cdot (l_c - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = \\ &= 0,34 \cdot \frac{4}{0,548} \cdot (0,302 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 0,183) = 0,507 \end{aligned} \quad (82)$$

Posledním hodnotou potřebnou pro určení je činitel diferenčního rozptylu statorového vinutí λ_{dif1} .

$$\xi = \left(2 \cdot \frac{t_{d2}}{t_{d1}} - \frac{t_{d1}}{t_{d2}} \cdot \Delta_z \right) \cdot k_\beta - k'_{v1} \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 =$$

$$= \left(2 \cdot \frac{18,53}{15,27} - \frac{15,27}{18,53} \cdot 0,2 \right) \cdot 0,906 - 0,924 \cdot \left(\frac{18,53}{15,27} \right)^2 = 0,695 \quad (83)$$

kde činitel Δ_z je určený z grafu 6.39 a) a jeho hodnota činí 0,2

Činitel diferenčního rozptylu statorového vinutí λ_{dif1}

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,01527}{12 \cdot 0,001 \cdot 1,528} \cdot 0,695 = 0,579 \quad (84)$$

Následně se může vypočítat reaktance statorového vinutí $X_{1\sigma}$ z následujícího vztahu.

$$X_{1\sigma} = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{Fe1}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{d1} + \lambda_{e1} + \lambda_{dif1}) =$$

$$= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{36}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,548}{3 \cdot 4} \cdot (1,596 + 0,507 + 0,579) = 0,099 \, \Omega \quad (85)$$

V této reaktanci $X_{1\sigma}$ není započítáný vliv natočení drážky, který má za následek zvýšení hodnoty a je spočítáný dále v textu.

Po určení reaktance statorového vinutí $X_{1\sigma}$ se může přejít na výpočet reaktance rotoru $X_{2\sigma}$. Postup je stejný jako v předchozím případě a nejdříve se musí určit činitele magnetické vodivosti λ .

Pro činitel magnetické vodivosti rotorové drážky λ_{d2} se použít vztah z tabulky 6.23 pro drážku na obr. 6.40d v [4].

Činitel magnetické vodivosti drážky rotoru λ_{d2}

$$\lambda_{d2} = \frac{h_1}{3 \cdot b} \cdot k_d + \frac{h_2}{b} + \frac{2 \cdot h_2}{b + 2 \cdot b_0} + \frac{h_0}{b_0} = \frac{34}{3 \cdot 5,5} \cdot 1 + \frac{0,2}{5,5} + \frac{2 \cdot 0,2}{5,5 + 2 \cdot 2} + \frac{2,5}{2} = 3,377 \quad (86)$$

kde $k_d = 1$ pro jmenovitý chod

Jelikož kruhy nakrátko nepřiléhají k železu rotoru, vypočítá se činitel magnetické vodivosti rozptylu čel λ_{e2} následovně.

$$\lambda_{e2} = \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l_{Fe2} \cdot \Delta^2} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot D_{kn}}{2 \cdot (a_{kn} + b_{kn})} \right) =$$

$$= \frac{2,3 \cdot 0,307}{59 \cdot 0,548 \cdot 0,318^2} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot 0,307}{2 \cdot (41 + 15)} \right) = 0,239 \quad (87)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu λ_{dif2}

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{0,01853}{12 \cdot 0,001 \cdot 1,528} \cdot 0,99 = 1 \quad (88)$$

$$\text{kde } \xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 3}{59} \right)^2 - \frac{0,015}{1 - \left(\frac{3}{59} \right)^2} = 0,99$$

Činitel Δ_{z2} je určený z grafu 6.39 a) a jeho hodnota činí 0,015.

Reaktance klece rotoru $X_{2\sigma}$ je pak následovná

$$\begin{aligned} X_{2\sigma} &= 7,9 \cdot f_1 \cdot l_{Fe2} \cdot (\lambda_{d2} + \lambda_{e2} + \lambda_{dif2}) = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,548 \cdot (3,377 + 0,239 + 1) \cdot 10^{-6} = 0,999 \cdot 10^{-3} \Omega \end{aligned} \quad (89)$$

Vliv natočení drážek se respektuje zvětšením rozptylových reaktancí statoru a rotoru o činiteli σ_γ , který se určí ze vztahu 90. Natočení drážek b_γ pro takto velký motor se volí maximálně jedna drážková rozteč. Pro tento případ je natočení drážek $b_\gamma = 0,00926$ m u rotoru, tedy polovina drážkové rozteče.

Činitel σ_γ

$$\sigma_\gamma \approx 1 + 0,41 \cdot \left(\frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \cdot \frac{U_{1N}}{X_{1\sigma} \cdot I_\mu} = 1 + 0,14 \cdot \left(\frac{0,00926}{0,1832} \right)^2 \cdot \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 0,099 \cdot 99,838} = 1,036 \quad (90)$$

Reaktance statoru $X_{1\sigma\gamma}$ a rotoru $X_{2\sigma\gamma}$ s uvažováním natočení drážek je

$$X_{1\sigma\gamma} = X_{1\sigma} \cdot \sigma_\gamma = 0,099 \cdot 1,036 = 0,103 \Omega \quad (91)$$

$$X_{2\sigma\gamma} = X_{2\sigma} \cdot \sigma_\gamma = 0,999 \cdot 10^{-3} \cdot 1,036 = 1,036 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (92)$$

Při známých hodnotách odporu a reaktance rotoru se může přejít na přepočet těchto hodnot na stator. V první části se musí určit převod mezi statorem a rotorem podle vztahu 93.

$$p_z = 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(32 \cdot 0,924)^2}{59} = 177,817 \quad (93)$$

Přepočítaný odpor R'_2 na stator je pak následující

$$R'_2 = R_2 \cdot p_z = 9,971 \cdot 10^{-5} \cdot 177,817 = 0,0176 \Omega \quad (94)$$

a přepočítaná reaktance $X'_{2\sigma}$ na stator

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma\gamma} \cdot p_z = 0,853 \cdot 10^{-3} \cdot 177,817 = 0,182 \Omega \quad (95)$$

Hodnoty odporu R_{12} a X_{12} jsou následující

$$R_{12} = \frac{\Delta P_{Feh}}{m \cdot I_\mu^2} = \frac{1430,795}{3 \cdot 99,838^2} = 0,0478 \Omega \quad (96)$$

$$X_{12} = \frac{U_{1N}}{I_\mu} - X_{1\sigma\gamma} = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 99,838} - 0,103 = 3,367 \Omega \quad (97)$$

kde hodnota ΔP_{Feh} je vypočtena v následující kapitole

5.1.6 Výpočet ztrát

Ztráty v asynchronním motoru se dělí na ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1} , ztráty v klecovém vinutí rotoru nakrátko ΔP_{j2} a ztráty v železe statoru ΔP_{FeH} . Dále se počítají ztráty povrchové $\Delta P_{\delta p}$ a pulsní ztráty ΔP_p , ztráty přídatné ΔP_d při zatížení a ztráty mechanické ΔP_{mech} .

Plechý použité pro statorový a rotorový svazek jsou ThyssenKrupp M330-50A, které mají měrnou hustotu $\rho_{Fe} = 7650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a jejich ztrátové číslo p při 1 T je $1,35 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ a při 1,5 T je $3,3 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, což je dáno německou normou DIN EN 10106. Výrobce má uvedené menší ztrátové číslo pro 1 T, a to $p_{1,0} = 1,33 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ a pro 1,5 T $p_{1,5} = 3,07 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. Pro výpočet ztrát se použijí hodnoty dané normou DIN EN 10106.

Pro výpočet ztrát v železe statoru se musí určit hmotnost jha a zubů statoru a pro výpočet pulsních ztrát hmotnost zubu statoru a rotoru.

Výpočet hmotnosti jha m_{j1} statorového svazku

$$m_{j1} = \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe1} \cdot \left[\frac{\pi \cdot (D_e^2 - (D + h_{d1})^2)}{4} - n_{avk1} \cdot \frac{\pi \cdot d_{avk1}^2}{4} \right] = \quad (98)$$

$$= 7650 \cdot 0,97 \cdot 0,548 \cdot \left[\frac{\pi \cdot (0,501^2 - (0,35 + 0,0365)^2)}{4} - 72 \cdot \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} \right] = 207,18 \text{ kg}$$

Určení hmotnosti zubu statoru m_{z1}

$$m_{z1} = \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe1} \cdot b_{z1av} \cdot h_{d1} = 7650 \cdot 0,97 \cdot 0,548 \cdot 0,00886 \cdot 0,0365 = 93,91 \text{ kg} \quad (99)$$

kde b_{z1av} je střední šířka drážky statoru a vypočítá se podle vztahu 100

$$b_{z1av} = \frac{1}{2} \cdot (b_{z1max} + b_{z1min}) = \frac{1}{2} \cdot (10,45 + 7,27) = 8,86 \text{ mm} \quad (100)$$

Určení hmotnosti zubu statoru m_{z2}

$$m_{z2} = \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe1} \cdot b_{z2av} \cdot h_{d2} = 7650 \cdot 0,97 \cdot 0,548 \cdot 0,01095 \cdot (0,0025 + 0,034) = 95,89 \text{ kg} \quad (101)$$

kde b_{z2av} je střední šířka drážky rotoru a vypočítá se podle vztahu 102

$$b_{z2av} = \frac{1}{2} \cdot (b_{z2max} + b_{z2min}) = \frac{1}{2} \cdot (12,74 + 9,163) = 10,95 \text{ mm} \quad (102)$$

$$n_B = 5,69 \cdot \log \left(\frac{p_{1,5}}{p_{1,0}} \right) = 5,69 \cdot \log \left(\frac{3,3}{1,35} \right) = 2,208 \quad (103)$$

Ztráty v železe jha statoru ΔP_{Fejh1} jsou vypočteny níže. Činitel k_{dj} a k_{dz} uvažuje vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v částech magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku.

$$\Delta P_{Fejh1} = p_{1,0} \cdot k_{dj} \cdot m_{jh1} \cdot B_{j1}^{n_p} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,3} = \quad (104)$$

$$= 1,35 \cdot 1,4 \cdot 207,18 \cdot 1,495^{2,208} \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} = 958,878 \text{ W}$$

Ztráty v zubu statoru ΔP_{Fez1}

$$\Delta P_{Fez1} = p_{1.0} \cdot k_{dz} \cdot m_{z1} \cdot B_{z1av}^{n_p} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,3} = 1,35 \cdot 1,4 \cdot 85,94 \cdot 1,426^{2,208} \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} = 471,917 \text{ W} \quad (105)$$

kde B_{z1av} je střední hodnota indukce v zubu statoru a vypočítá se podle vztahu 106

$$B_{z1av} = \frac{B_{z1max} + B_{z1pul} + B_{z1min}}{3} = \frac{1,732 + 1,341 + 1,205}{3} = 1,426 \text{ T} \quad (106)$$

Ztráty v železe statoru jsou následovné

$$\Delta P_{Feh} = \Delta P_{Fejh1} + \Delta P_{Fez1} = 958,878 + 471,917 = 1430,795 \text{ W} \quad (107)$$

Po určení ztrát v železe statorového svazku se může přejít na určení dodatečných ztrát v železe ΔP_{Fed} a jako první se určí povrchové ztráty $\Delta P_{\delta p1(2)}$. Pro tyto ztráty je nutné znát amplitudu pulsací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami statoru nebo rotoru. Ze vztahu 108 a 109 je vidět, že jediná neznámá β_{01} a β_{02} , které závisí na poměru otevření drážek $b_{01(2)}$ ke vzduchové mezeře δ , a odečítá se z obr 6.41 v [4]. Hodnota β_{01} byla stanovena 0,12 a hodnota β_{02} byla stanovena 0,374.

$$B_{01} = \beta_{01} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,12 \cdot 1,528 \cdot 0,8 = 0,146 \text{ T} \quad (108)$$

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,374 \cdot 1,528 \cdot 0,8 = 0,457 \text{ T} \quad (109)$$

Při známé hodnotě amplitudy pulsací indukce se může vypočítat hustota povrchových ztrát $p_{\delta p1(2)}$, kde index 1 označuje stator a index 2 rotor. Činitel k_{01} a k_{02} respektuje vliv opracování povrchu hlav zubů statoru a rotoru a byl zvolen 2.

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Q_2 n_s}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_{d2} \cdot 10^3)^2 = \quad (110)$$

$$= 0,5 \cdot 2 \cdot \left(\frac{59 \cdot 1000}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,146 \cdot 0,01853 \cdot 10^3)^2 = 105,871 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Q_1 n_s}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2 = \quad (110)$$

$$= 0,5 \cdot 2 \cdot \left(\frac{72 \cdot 1000}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,457 \cdot 0,01853 \cdot 10^3)^2 = 941,467 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Celkové povrchové ztráty v statoru $\Delta P_{\delta p1}$ a v rotoru $\Delta P_{\delta p2}$.

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} \cdot (t_{d1} - b_{01}) \cdot Q_1 \cdot l_{Fe1} = 105,871 \cdot (0,01527 - 0,008) \cdot 72 \cdot 0,548 = 30,368 \text{ W} \quad (112)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\delta p2} &= p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} = \\ &= 941,467 \cdot (0,01853 - 0,002) \cdot 59 \cdot 0,548 = 503,165 \text{ W} \end{aligned} \quad (113)$$

Před určením pulsních ztrát se musí nalézt amplituda pulsací indukce ve středním průměru zubu statoru B_{p1} a rotoru B_{p2} .

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d1}} \cdot B_{z1av} = \frac{0,663 \cdot 0,001}{2 \cdot 0,01527} \cdot 1,426 = 0,0309 \text{ T} \quad (114)$$

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} \cdot B_{z2av} = \frac{0,932 \cdot 0,001}{2 \cdot 0,01853} \cdot 1,442 = 0,0258 \text{ T} \quad (115)$$

Aby se mohla vypočítat tato indukce, musí se nejdříve vypočítat hodnoty γ_1 a γ_2 . V těchto vztazích figuruje tzv. náhradní otevření drážky $b'_{01(2)}$.

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b'_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b'_{01}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{2,674}{1}\right)^2}{5 + \frac{2,674}{1}} = 0,932 \quad (116)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b'_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b'_{02}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{2,182}{1}\right)^2}{5 + \frac{2,182}{1}} = 0,663 \quad (117)$$

Náhradní otevření drážky $b'_{01(2)}$ se vypočítá podle následujících vztahů.

$$b'_{01} = \frac{b_{01}}{3} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot t_{d1}}{t_{d1} \cdot b_{01} + \chi_{\delta 1}}\right) = \frac{8}{3} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot 15,27}{15,27 \cdot 8 + 2,7}\right) = 2,674 \text{ mm} \quad (118)$$

$$b'_{02} = \frac{b_{02}}{3} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot t_{d2}}{t_{d2} \cdot b_{02} + \chi_{\delta 2}}\right) = \frac{2}{3} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot 18,53}{18,53 \cdot 2 + 1,3}\right) = 2,182 \text{ mm} \quad (119)$$

kde činitel χ_1 a χ_2 jsou odečteny z obr. 6.42 v [4] a jedná se o poměr šířky statorové drážky b_{d1} nebo rotorové drážky b_{d2} ke vzduchové mezeře δ

Po určení amplitudy pulsací indukce ve středním průřezu zubu statoru B_{p1} a rotoru B_{p2} se může přejít na určení pulsních ztrát v zubech statoru ΔP_{p1} a rotoru ΔP_{p2} .

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n_s}{1000} \cdot B_{p1}\right)^2 \cdot m_{z1} = 0,11 \cdot \left(\frac{59 \cdot 1000}{1000} \cdot 0,0309\right)^2 \cdot 93,91 = 34,457 \text{ W} \quad (120)$$

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n_s}{1000} \cdot B_{p2}\right)^2 \cdot m_{z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{72 \cdot 1000}{1000} \cdot 0,0258\right)^2 \cdot 95,89 = 36,399 \text{ W} \quad (121)$$

Jelikož už jsou vypočteny všechny dodatečné ztráty v železe, může se přejít na určení celkových dodatečných ztrát ΔP_{Fed} a to není nic jiného než suma dílčích dodatečných ztrát.

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 30,368 + 503,165 + 34,457 + 36,399 = 604,39 \text{ W} \quad (122)$$

Celkové ztráty v železe ΔP_{Fe}

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 1430,795 + 604,39 = 2035,186 \text{ W} \quad (123)$$

Pro výpočet mechanických ztrát ΔP_{mech} se musí spočítat činitel K_T .

$$\Delta P_{mech} = K_T \cdot \left(\frac{n_s}{1000}\right)^2 \cdot D_e^4 = 0,648 \cdot \left(\frac{1000}{1000}\right)^2 \cdot 0,501^4 = 408,691 \text{ W} \quad (124)$$

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_e) = 1,3 \cdot (1 - 0,501) = 0,648$$

Přídavné ztráty při zatížení ΔP_{dN} jsou určeny jako 0,5% z příkonu stroje P_1 .

$$\Delta P_{dN} = 0,005 \cdot \frac{P_2}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{300000}{0,94} = 1595,745 \text{ W} \quad (125)$$

Jalová složka proudu naprázdno I_{0j} je stejná jako magnetizační proud I_μ

$$I_{0j} = I_\mu = 99,838 \text{ A} \quad (126)$$

Ztráty naprázdno ve vinutí statoru

$$\Delta P_{j0} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_\mu^2 = 3 \cdot 17,92 \cdot 10^{-3} \cdot 99,838^2 = 536,135 \text{ W} \quad (127)$$

Činný proud naprázdno se vypočítá ze ztrát naprázdno ve vinutí a z mechanických ztrát a ztrát v železe, které jsou stejné jako při jmenovitém chodu.

$$I_{0\epsilon} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 \cdot U_{1N}} = \frac{2035,186 + 411,138 + 536,135}{3 \cdot 346,41} = 2,867 \text{ A} \quad (128)$$

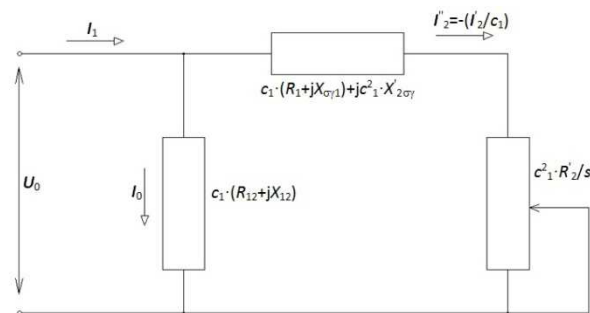
Proud naprázdno

$$I_0 = \sqrt{I_{0\epsilon}^2 + I_{0j}^2} = \sqrt{2,867^2 + 99,838^2} = 99,879 \text{ A} \quad (129)$$

Účinník naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\epsilon}}{I_0} = \frac{2,867}{99,879} = 0,0287$$

Po určení uvedených ztrát se musí vypočítat jmenovitá hodnota proudu I_{1N} , neboť tvar drážek statoru a rotoru a materiál vinutí a klece má vliv na odpory a reaktance. Tím se mění dříve zvolený účinník $\cos \varphi$ a účinnost η , které byly odečteny z grafu a výpočet se bude provádět pomocí redukovaného náhradního schématu na obr. 17.



Obr. 17 Redukované náhradní schéma asynchronního stroje[4]

Před začátkem se musí určit činitele c_1 , a , a' a b . Odpor R_{12} a X_{12} je vypočítaný v kapitole 6.1.5 a může se přejít k výpočtu činitelů. Činitel $b' = 0$, neboť se jedná o motor o výkonu 300 kW a jalová složka činitele c_1 má zanedbatelnou hodnotu vůči činné složce tohoto činitele.

$$c_1 = 1 + \frac{X_{1\sigma\gamma}}{X_{12}} = 1 + \frac{0,103}{3,367} = 1,0305 \text{ } \Omega \quad (130)$$

$$a = c_1 \cdot R_1 = 1,0305 \cdot 0,01793 = 0,0185 \text{ } \Omega \quad (131)$$

$$a' = c_1^2 = 1,0305^2 = 1,0619 \text{ } \Omega \quad (132)$$

$$b = c_1 \cdot (X_{1\sigma\gamma} + c_1 \cdot X_{2\sigma}') = 1,032 \cdot (0,103 + 1,0305 \cdot 0,182) = 0,299 \text{ } \Omega \quad (133)$$

Pro výpočet zatěžovacích charakteristik se musí vytvořit tabulka, která je součástí příloh a je označena jako příloha II, a je provedena v rozmezí 0,2 až 1,5 předběžného skluzu $s_{\text{před}}$. Předběžný skluz $s_{\text{před}}$ je roven poměrnému odporu r'_2 . Zde bude uveden pouze výpočet pro skluz $1,0316 \cdot s_{\text{před}}$.

$$r'_2 = s_{\text{před}} = R'_2 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,0176 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 341,22}{600} = 0,0173 \quad (134)$$

$$s = 1,0516 \cdot s_{\text{před}} = 1,0316 \cdot 0,0173 = 0,01987 \quad (135)$$

Tento skluz odpovídá jmenovitému, takže následující hodnoty jsou brány jako jmenovité.

Jako první se určí odpor R a reaktance X .

$$R = a + a' \cdot \frac{R'_2}{s} = 0,0185 + 1,0619 \cdot \frac{0,0176}{0,01786} = 1,063 \, \Omega \quad (136)$$

$$X = b + b' \cdot \frac{R'_2}{s} = 0,299 + 0 \cdot \frac{0,0176}{0,01987} = 0,299 \, \Omega \quad (137)$$

Předchozích vztahů je vidět, že odpor a reaktance jsou závislé za skluzu motoru, a proto bude i hodnota impedance Z pro každý skluz jiná.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{1,063^2 + 0,299^2} = 1,105 \, \Omega \quad (138)$$

Po určení hodnoty impedance Z se může vypočítat předběžný proud v rotoru I_2'' .

$$I_2'' = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 1,105} = 313,51 \, \text{A} \quad (139)$$

Aby se mohla určit činná $I_{1\epsilon}$ a jalová I_{1j} složka proudu I_1 , musí se vypočítat $\cos \varphi_2'$ a $\sin \varphi_2'$.

$$\cos \varphi_2' = \frac{R}{Z} = \frac{1,063}{1,105} = 0,962 \quad (140)$$

$$\sin \varphi_2' = \frac{X}{Z} = \frac{0,299}{1,105} = 0,271 \quad (141)$$

Pro určení výše uvedených složek je nutné znát činnou $I_{0\epsilon}$ a jalovou složku I_{0j} proudu naprázdno I_0 . Jalová složka proudu naprázdno I_{0j} je stejná jako magnetizační proud I_μ . Činná složka proudu naprázdno $I_{0\epsilon}$ je vypočítána z vztahu 128.

$$I_{1\epsilon} = I_{0\epsilon} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2' = 2,867 + 313,51 \cdot 0,962 = 304,62 \, \text{A} \quad (142)$$

$$I_{1j} = I_{0j} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2' = 99,838 + 313,51 \cdot 0,271 = 184,89 \, \text{A} \quad (143)$$

Následně se určí proud tekoucí statorovým vinutím.

$$I_1 = \sqrt{I_{1\epsilon}^2 + I_{1j}^2} = \sqrt{304,62^2 + 184,89^2} = 356,35 \, \text{A} \quad (144)$$

Přepočtený proud I_2' je pak následující

$$I_2' = c_1 \cdot I_2'' = 1,0305 \cdot 313,51 = 323,08 \, \text{A} \quad (145)$$

Při znalosti proudu $I_{1\epsilon}$, který je dodáváný ze sítě se může vypočítat příkon P_1 stroje pro daný skluz.

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1N} \cdot I_{1\epsilon} \cdot 10^{-3} = \sqrt{3} \cdot 600 \cdot 304,62 \cdot 10^{-3} = 316,373 \, \text{kW} \quad (146)$$

Joulové ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1} a v kleci rotoru ΔP_{j2} jsou vypočteny podle následujících vztahů.

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 0,01793 \cdot 356,35^2 \cdot 10^{-3} = 6,829 \text{ kW} \quad (147)$$

$$\Delta P_{j2} = 3 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 0,0176 \cdot 323,08^2 \cdot 10^{-3} = 5,504 \text{ kW} \quad (148)$$

Přídavné ztráty ΔP_{dN}

$$\Delta P_d = \Delta P_{dN} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2 = 1,596 \cdot \left(\frac{356,35}{356,35} \right)^2 = 1,596 \text{ kW} \quad (149)$$

Celkové ztráty ΔP jsou pak následující

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_{meh} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_d = \\ &= 2,035 + 0,408 + 6,829 + 5,504 + 1,596 = 16,373 \text{ kW} \end{aligned} \quad (150)$$

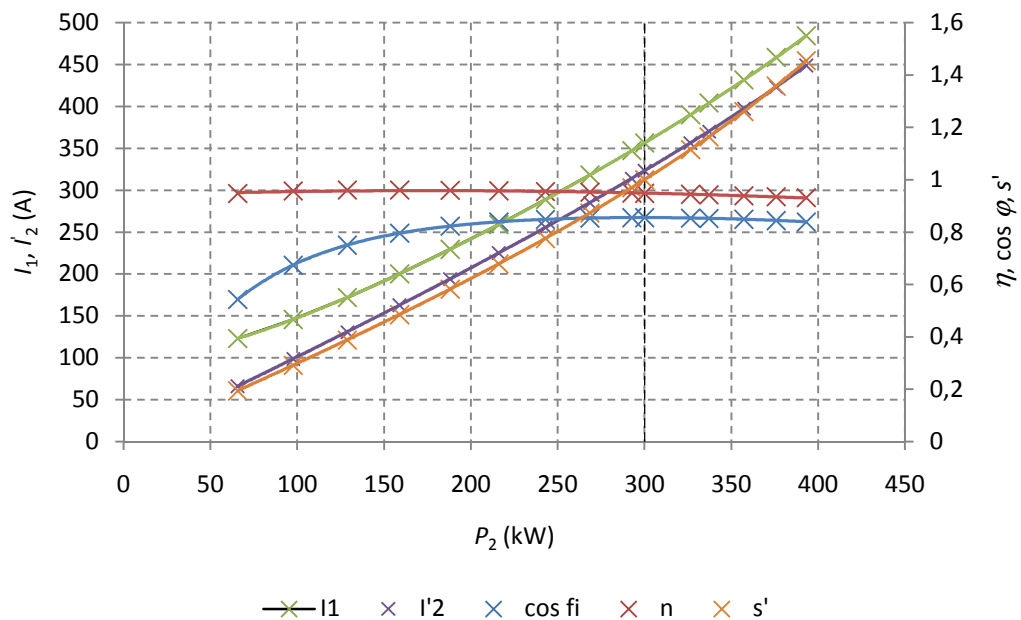
a výkon na hřídeli motoru P_2 je

$$P_2 = P_1 - \Delta P = 316,373 - 16,373 = 300 \text{ kW} \quad (151)$$

V poslední řadě se musí určit účinnost η a účiník $\cos \varphi$.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{300}{316,58} = 0,948 \quad (152)$$

$$\cos \varphi = \frac{I_{1\epsilon}}{I_1} = \frac{304,62}{356,35} = 0,855 \quad (153)$$



Obr. 18 Zatěžovací charakteristiky pro určení jmenovitých hodnot

Z grafu byly odečteny jmenovité hodnoty pro výkon P_2 , které jsou uvedeny v následující tabulce. Nutno uvést, že skluz je v grafu v poměrné hodnotě.

Tab. 13 jmenovité hodnoty motoru

P_{2N} (kW)	U_{1N} (V)	I_{1N} (A)	M_N (N·m)	n_N (-)	s_N (-)	η_N (-)	$\cos \varphi_N$ (-)
300	600/347	356,35	2918,7	982,14	0,0178	0,948	0,855

5.1.7 Rozběhové charakteristiky

Rozběhové charakteristiky se počítají pro rozsah skluzu $1 \geq s \geq s_{MAX}$. Předběžný maximální skluz s_{pMAX} je dán vztahem 154. Výpočet je proveden pro skluz $s = 1$.

$$s_{pMAX} = \frac{R_2'}{\frac{X_{1\sigma}}{c_1} + X_{2\sigma}'} = \frac{0,0176}{\frac{0,099}{1,0305} + 0,182} = 0,0633 \quad (154)$$

V první řadě se musí určit tzv. redukováná výška vodiče ξ .

$$\xi = 2 \cdot \pi \cdot a_t \cdot \sqrt{\frac{b_t}{b_{d2}} \cdot \frac{f_2}{\rho_{145}} \cdot 10^{-7}} = 2 \cdot \pi \cdot 0,0053 \cdot \sqrt{\frac{0,0338}{0,034} \cdot \frac{50 \cdot 1}{2,586 \cdot 10^{-8}} \cdot 10^{-7}} = 2,859 \quad (155)$$

Pro určení hloubky vniku proudu v tyči h_R se potřebuje odečíst činitel $\varphi(\xi)$ z obr. 6.46 v [4]. Jeho hodnota činí $\varphi(\xi) = 1,8$.

$$h_R = \frac{h_t}{1 + \varphi(\xi)} = \frac{0,0338}{1 + 1,8} = 0,0121 \text{ m} \quad (156)$$

Pro obdélníkové tyče se vypočte činitel k_R , který udává, kolikrát se zvětšil odpor drážkové části tyče při nerovnoměrném rozložení hustoty proudu ve srovnání s odporem bez působení povrchového jevu.

$$k_R = \frac{h_t}{h_R} = \frac{0,0338}{0,0121} = 2,8 \quad (157)$$

Pro další výpočty je nutné uvažovat změnu celého odporu rotorového vinutí R_2 a musí se zavést činitel K_R , který udává celkové zvětšení odporu fáze rotoru vlivem povrchového jevu.[4]

$$K_R = 1 + \frac{R_t}{R_2} \cdot (k_R - 1) = 1 + \frac{8,558 \cdot 10^{-5}}{9,971 \cdot 10^{-5}} \cdot (2,8 - 1) = 2,545 \quad (158)$$

Poté je odpor fáze rotorového vinutí s uvažováním povrchového jevu $R_{2\xi}'$ následovný.

$$R_{2\xi}' = K_R \cdot R_2' = 2,545 \cdot 0,0176 = 0,0447 \text{ } \Omega \quad (159)$$

Při rozběhu se mění rozptylová reaktance rotorového vinutí $X_{2\sigma\xi}'$. Před určení této reaktance se musí vypočítat činitel K_X , který udává změnu rozptylové reaktance fáze rotorového vinutí vlivem povrchového jevu. Pro výpočet K_X se musí nejdříve určit činitel magnetické vodivosti drážky $\lambda_{d2\xi}$ při uvažování povrchového jevu. Velikost k_d se odečte z obr. 4.67 v [4] a jeho hodnota je 0,54.

$$\lambda_{d2\xi} = \frac{h_1}{3 \cdot b} \cdot k_d + \frac{h_2}{b} + \frac{2 \cdot h_2}{b + 2 \cdot b_0} + \frac{h_0}{b_0} = \frac{34}{3 \cdot 5,5} \cdot 0,54 + \frac{0,2}{5,5} + \frac{2 \cdot 0,2}{5,5 + 2 \cdot 2} + \frac{2,5}{2} = 2,435 \quad (160)$$

Činitel K_X potom je

$$K_X = \frac{\lambda_{d2\xi} + \lambda_{e2} + \lambda_{dif2}}{\lambda_{d2} + \lambda_{e2} + \lambda_{dif2}} = \frac{2,435 + 0,239 + 1}{3,377 + 0,239 + 1} = 0,796 \quad (161)$$

a rozptylová reaktance rotorového vinutí s uvažováním povrchové jevu $X'_{2\sigma\xi}$ je

$$X'_{2\sigma\xi} = K_X \cdot X'_{2\sigma} = 0,796 \cdot 0,182 = 0,145 \, \Omega \quad (162)$$

Se znalostí změn odporu a reaktance se může vypočítat proud I'_2 bez vlivu nasycení podle vztahu 163.

$$I'_2 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_{2\xi}}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma\xi})^2}} = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{\left(0,01773 + \frac{0,045}{1}\right)^2 + (0,103 + 0,145)^2}} = 1354 \, \text{A} \quad (163)$$

Následně se vypočte střední magnetické napětí vinutí F_{dav} , vztažené na jednu drážku statorového vinutí, při uvažování vlivu nasycení.

$$F_{\text{dav}} = 0,7 \cdot \frac{k_n \cdot I'_2 \cdot V_{d1}}{a} \cdot \left(k'_\beta + k_y \cdot k_{v1} \cdot \frac{Q_1}{Q_2}\right) = 0,7 \cdot \frac{1,4 \cdot 1354 \cdot 8}{3} \cdot \left(0,875 + 0,833 \cdot 0,924 \cdot \frac{72}{59}\right) = 14415 \, \text{A} \quad (164)$$

kde činitel k_n je násobek proudu při nasycení a pro s_{max} je $k_n = 1,1$ a pro $s = 1$ je $k_n = 1,4$. k_n pro hodnoty skluzu mezi s_{max} a $s = 1$ je vypočítaný podle rovnice přímky $k_n = 0,327 \cdot s + 1,072$.

Po určení středního magnetického napětí vinutí F_{dav} , se může vypočítat fiktivní indukce $B_{f\delta}$ ve vzduchové mezeře.

$$B_{f\delta} = \frac{F_{\text{dav}}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_n} \cdot 10^{-6} = \frac{14415}{1,6 \cdot 0,001 \cdot 1,07} \cdot 10^{-6} = 8,42 \, \text{T} \quad (165)$$

kde činitel C_n se vypočítá následovně

$$C_n = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{d1} + t_{d2}}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{15,27 + 18,53}} = 1,07 \quad (166)$$

Pro další výpočty se musí vypočítat dodatečné otevření statorové drážky Δb_{01} z důvodů nasycení rozptylových cest.

$$\Delta b_{01} = (t_{d1} - b_{01}) \cdot (1 - \chi_\delta) = (0,01527 - 0,008) \cdot (1 - 0,375) = 0,005 \, \text{m} \quad (167)$$

kde činitel χ_δ se určí z obr. 6.50 v [4]

Při nasycení rozptylových cest dochází k zmenšení činitele magnetické vodivosti drážky rozptylu λ_{d1n} a diferenčního rozptylu $\lambda_{\text{dif}1n}$. Zmenšení činitele magnetické vodivosti drážky rozptylu $\Delta\lambda_{d1n}$ vlivem nasycení se vypočítá následovně.

$$\Delta\lambda_{d1n} = \frac{h_{01}}{b_{01}} \cdot \frac{\Delta b_{01}}{b_{01} + \Delta b_{01}} = \frac{0,0007}{0,008} \cdot \frac{0,005}{0,008 + 0,005} = 0,168 \quad (168)$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu λ_{d1n} vlivem nasycení je

$$\lambda_{d1n} = \lambda_{d1} - \Delta\lambda_{d1n} = 1,596 - 0,168 = 1,428 \quad (169)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu λ_{dif1n} se vypočítá následovně.

$$\lambda_{dif1n} = \lambda_{dif1} \cdot \chi_{\delta} = 0,579 \cdot 0,375 = 0,217 \quad (170)$$

Nyní se může vypočítat reaktance satorového vinutí $X_{1\sigma n}$ s uvažováním vlivu nasycení.

$$X_{1\sigma n} = X_{1\sigma} \cdot \frac{\lambda_{d1n} + \lambda_{\epsilon1} + \lambda_{dif1n}}{\lambda_{d1} + \lambda_{\epsilon1} + \lambda_{dif1}} = 0,103 \cdot \frac{1,428 + 0,507 + 0,217}{1,596 + 0,507 + 0,579} = 0,082 \, \Omega \quad (171)$$

Stejný postup se udělá pro výpočet přepočtené reaktance rotorového vinutí $X'_{2\sigma\xi n}$ s uvažováním vlivu nasycení. Dodatečné otevření rotorové drážky Δb_{02} se vypočítá následovně.

$$\Delta b_{02} = (t_{d2} - b_{02}) \cdot (1 - \chi_{\delta}) = (0,01853 - 0,002) \cdot (1 - 0,375) = 0,01 \, \text{m} \quad (172)$$

Zmenšení činitele magnetické vodivosti drážkového rozptylu $\Delta\lambda_{d2n}$ vlivem nasycení je

$$\Delta\lambda_{d2n} = \frac{h_{02}}{b_{02}} \cdot \frac{\Delta b_{02}}{b_{02} + \Delta b_{02}} = \frac{0,0025}{0,002} \cdot \frac{0,01}{0,002 + 0,01} = 1,047 \quad (173)$$

Činitel magnetické vodivosti drážky rozptylu $\lambda_{d2\xi n}$ vlivem nasycení je

$$\lambda_{d2\xi n} = \lambda_{d2\xi} - \Delta\lambda_{d2n} = 2,435 - 1,047 = 1,387 \quad (174)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu λ_{dif2n} se vypočítá následovně.

$$\lambda_{dif2n} = \lambda_{dif2} \cdot \chi_{\delta} = 1 \cdot 0,375 = 0,375 \quad (175)$$

Nyní se může vypočítat reaktance satorového vinutí $X'_{2\sigma\xi n}$ s uvažováním vlivu nasycení.

$$X'_{2\sigma\xi n} = X'_{2\sigma} \cdot \frac{\lambda_{d2\xi n} + \lambda_{\epsilon2} + \lambda_{dif2n}}{\lambda_{d2} + \lambda_{\epsilon2} + \lambda_{dif2}} = 0,182 \cdot \frac{1,387 + 0,239 + 0,375}{3,377 + 0,239 + 1} = 0,079 \, \Omega \quad (176)$$

Vzájemná reaktance X_{12n} s uvažováním vlivu nasycení se zvětšuje a vypočítá se

$$X_{12n} = X_{12} \cdot \frac{F_m}{U_{\delta}} = 3,367 \cdot \frac{2645,323}{1945,417} = 4,578 \, \Omega \quad (177)$$

Při výpočtu rozběhových charakteristik se zanedbává odpor R_{12} a dochází k zavedení nepatrné chyby do výpočtu.[4] Když se vyjde z toho předpokladu, tak pro činitel c_{1pn} platí

$$c_{1pn} = 1 + \frac{X_{1\sigma n}}{X_{12n}} = 1 + \frac{0,082}{4,578} = 1,018 \quad (178)$$

Poté je činitel a_p

$$a_p = R_1 + c_{1p} \cdot \frac{R'_{2\xi}}{s} = 0,0173 + 1,018 \cdot \frac{0,045}{1} = 0,063 \, \Omega \quad (179)$$

a činitel b_p

$$b_p = X_{1\sigma n} + c_{1p} \cdot X'_{2\sigma\xi n} = 0,082 + 1,018 \cdot 0,079 = 0,163 \, \Omega \quad (180)$$

Po výpočtu činitelů a_p a b_p se může přejít na určení přepočteného proudu I'_2

$$I'_2 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{a_p^2 + b_p^2}} = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,063^2 + 0,163^2}} = 1979,9 \, \text{A} \quad (181)$$

a proud statorem I_1 je pak následující

$$I_1 = I_2' \cdot \frac{\sqrt{a_p^2 + (b_p + X_{12n})^2}}{c_{1pn} \cdot X_{12n}} = 1949,32 \cdot \frac{\sqrt{0,063^2 + (0,163 + 4,578)^2}}{1,018 \cdot 4,578} = 2014,4 \text{ A} \quad (182)$$

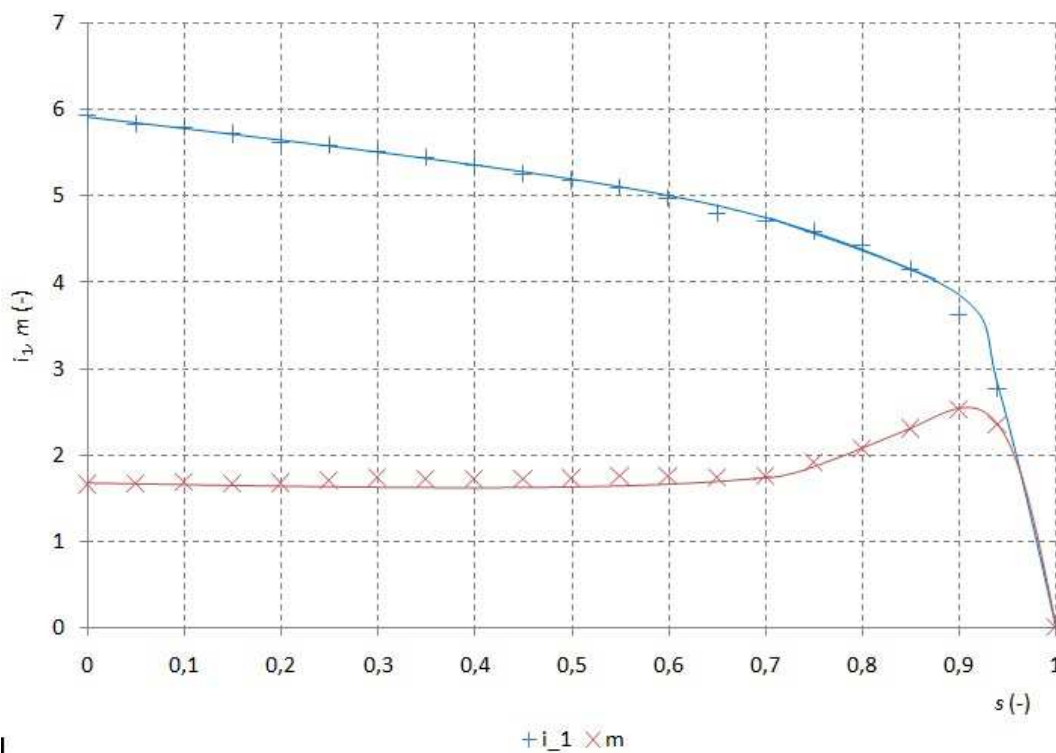
Proudy I_1 a I_2 , u kterých se uvažuje vliv sycení, musí být maximálně o 15% větší než dříve vypočtený součin proudu I_2' a činitele k_n . V tomto případě je rozdíl menší než 15% a výpočet tedy vyhovuje. V případě většího rozdílu než 15% se musí provést korekce činitele k_n .

Jelikož jsou známy proudy I_1 pro různé skluzy s , může se určit poměrný záběrný proud i_1 a poměrný záběrný moment m .

$$i_1 = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{2014,4}{356,334} = 5,903 \quad (183)$$

$$m = \left(\frac{I_2'}{I_{2N}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_N}{s} = \left(\frac{1979,9}{323,08} \right)^2 \cdot 2,545 \cdot \frac{0,0178}{1} = 1,707 \quad (184)$$

Tabulka výpočtu pro jednotlivé skluzy je uvedena v příloze III.



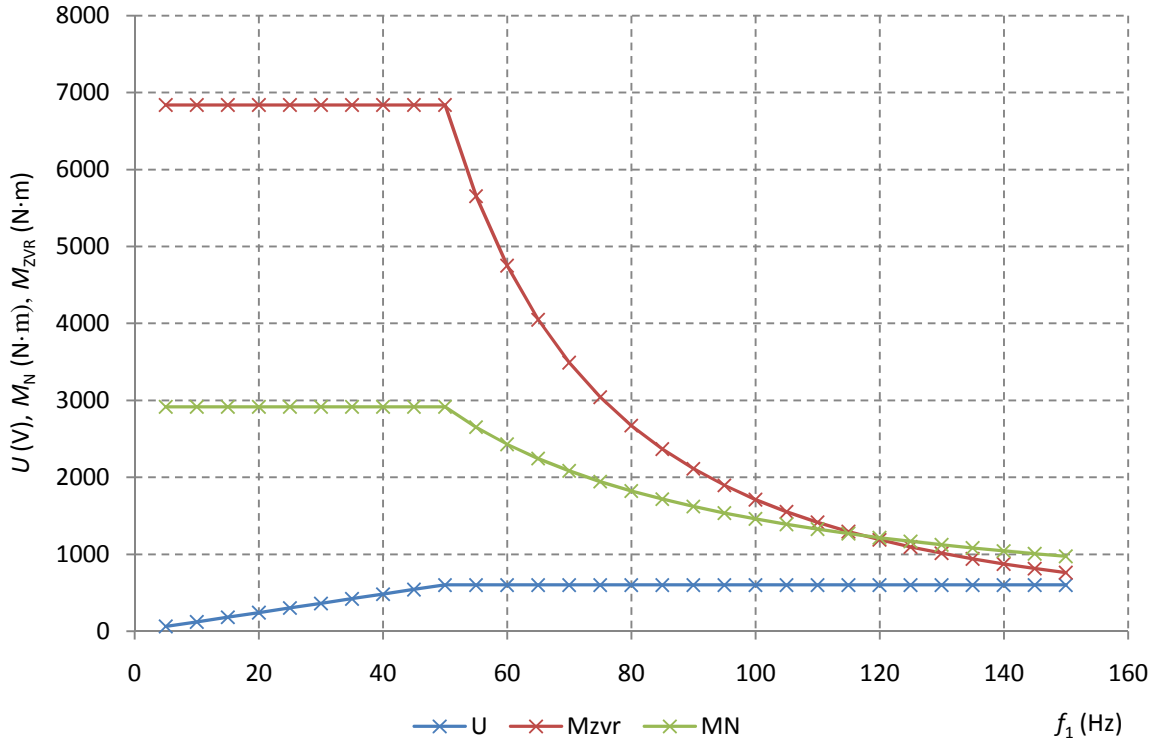
Obr. 19 Poměrné hodnoty proudu a momentu

Z obr. 19 je vidno, že maximální moment M_{MAX} je pro skluz $s_{MAX} = 0,1$. Pro tento skluz je poměrný proud $i_1 = 3,566$ a poměrný maximální moment $m_{MAX} = 2,525$. Dále byl určen poměrný záběrný proud $i_{ZAB} = 5,903$ a poměrný záběrný moment $m_{ZAB} = 1,707$.

5.1.8 Trakční charakteristiky motoru

Důležitým ukazatelem motoru je trakční charakteristika. Není to nic jiného než závislost napájecí frekvence f_1 na napájecím napětí U , jmenovitém momentu M_N a momentu zvratu M_{ZVR} .

V kapitole 4.1.6 bylo pojednáváno o trakčních charakteristikách. Z obr. 20 je vidět, že motor má maximální napájecí frekvenci $f_{MAX} = 115$ Hz. Při dosažení této frekvence dochází k omezení moment zvratu M_{ZVR} a motor už není možné provozovat na vyšší frekvenci. Z tohoto plyne, že motor má maximální otáčky $n_{MAX} = 2300 \text{ min}^{-1}$.



Obr. 20 Trakční charakteristika motoru

5.1.9 Oteplení

Určení oteplení vychází ze znalosti jmenovitých ztrát, které jsou větší v izolovaných vinutí statoru a rotoru. Musí se proto určit koeficient zvýšení ztrát k_p pro maximální přípustnou teplotu dané tepelné třídy.

$$k_p = \frac{\rho_{200}}{\rho_{145}} = \frac{2,965 \cdot 10^{-8}}{2,586 \cdot 10^{-8}} = 1,147 \quad (185)$$

Následně můžeme vypočítat Jouleovi ztráty ve vinutí statoru, které jsou větší o koeficient zvýšení ztrát k_p , a dělí se na ztráty v drážkách $\Delta P'_{jd1}$ a ztráty v čelech cívek $\Delta P'_{jc1}$.

$$\Delta P'_{jd1} = k_p \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot l_{Fe1}}{l_{av1}} = 1,147 \cdot 6829 \cdot \frac{2 \cdot 0,548}{1,699} = 5284,3 \text{ W} \quad (186)$$

$$\Delta P'_{jc1} = k_p \cdot \Delta P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot l_{c1}}{l_{av1}} = 1,147 \cdot 6829 \cdot \frac{2 \cdot 0,302}{1,699} = 2911,2 \text{ W} \quad (187)$$

Po určení zvýšených ztrát ve vinutí statoru se může vypočítat oteplení vnitřního povrchu statorového svazku nad teplotu vzduchu uvnitř stroje $\Delta \vartheta_{pov1}$.

$$\Delta \vartheta_{pov1} = K \cdot \frac{\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}}{\pi \cdot D \cdot l_{Fe1} \cdot \alpha_1} = 0,78 \cdot \frac{5284,3 + 1430,795}{\pi \cdot 0,35 \cdot 0,548 \cdot 130} = 66,86 \text{ K} \quad (188)$$

kde součinitel přestupu tepla α_1 určený z grafu 6.60 a) v [4] a jeho hodnota je $130 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a činitel K je určený z tabulky 6.30 v [4] a jeho hodnota je 0,78

Před určením teplotního spádu v izolaci drážky statorového vinutí $\Delta \vartheta_{id1}$ se musí vypočítat obvod statorové drážky O_{d1} . Střední tepelná vodivost drážkové izolace λ_{ekv} je $0,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

$$O_{d1} = 2 \cdot (h_{d1} + b_{d1}) = 2 \cdot (0,0365 + 0,008) = 0,089 \text{ m} \quad (189)$$

Jednostranná tloušťka izolace $b_{i1} = 1 \text{ mm}$

$$\Delta \vartheta_{id1} = \frac{\Delta P'_{jd1}}{Q_1 \cdot O_{d1} \cdot l_{Fe1}} \cdot \frac{b_{i1}}{\lambda_{ekv}} = \frac{5284,3}{72 \cdot 0,089 \cdot 0,548} \cdot \frac{0,001}{0,3} = 2,51 \text{ K} \quad (190)$$

Teplotní spád na tloušťce izolace čel $\Delta \vartheta_{ic1}$

$$\Delta \vartheta_{ic1} = \frac{\Delta P'_{jc1}}{Q_1 \cdot O_{c1} \cdot l_{c1}} \cdot \frac{b_{ic1}}{\lambda_{ekv}} = \frac{2836,7}{72 \cdot 0,086 \cdot 0,302} \cdot \frac{0,0008}{0,3} = 1,11 \text{ K} \quad (191)$$

kde O_{c1} je stejné jako O_{d1}

Oteplení vnějšího povrchu izolace čel vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje $\Delta \vartheta_{povc1}$

$$\Delta \vartheta_{povc1} = K \cdot \frac{\Delta P'_{jc1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_v \cdot \alpha_1} = 0,78 \cdot \frac{2911,2}{2 \cdot \pi \cdot 0,35 \cdot 0,0737 \cdot 130} = 107,69 \text{ K} \quad (192)$$

Následně se vypočítá střední oteplení statorového svazku vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje $\Delta \vartheta_1$.

$$\Delta \vartheta_1 = \frac{(\Delta \vartheta_{povc1} + \Delta \vartheta_{id1}) \cdot 2 \cdot l_{Fe1} + (\Delta \vartheta_{ic1} + \Delta \vartheta_{povc1}) \cdot 2 \cdot l_{c1}}{l_{av1}} = \quad (193)$$

$$\frac{(66,86 + 2,51) \cdot 2 \cdot 0,548 + (1,11 + 107,69) \cdot 2 \cdot 0,302}{1,699} = 83,37 \text{ K}$$

Před výpočtem oteplení vzduchu uvnitř stroje nad teplotu okolního prostředí $\Delta \vartheta_v$ se vypočítá ekvivalentní ochlazovací povrch tělesa $S_{t\bar{e}l}$ a součet všech ztrát odváděných do vzduchu uvnitř stroje $\Sigma \Delta P'_v$. Při výpočtu všech ztrát se neuvažuje výkon spotřebovaný vnějším ventilátorem, který vhání vzduch do stroje.

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P'_v &= \Sigma \Delta P + (k_\rho - 1) \cdot (\Delta P_{j1} + \Delta P_{j2}) - (1 - K) \cdot (\Delta P'_{jd1} + \Delta P_{Feh}) - 0,9 \cdot \Delta P_{mech} = \\ &= 16373 + (1,147 - 1) \cdot (6829 + 5504) - (1 - 0,78) \cdot (5284,3 + 1430,795) - 0,9 \cdot 408,691 = \\ &= 16654,2 \text{ W} \end{aligned} \quad (194)$$

Ekvivalentní ochlazovací povrch tělesa stroje $S_{t\bar{e}l}$ je dána axiálními ventilačními kanálky a jejich hodnota je $S_{t\bar{e}l} = 1,239 \text{ m}^2$. Výpočtový vztah je součástí výpočtu hmotnosti jha statoru m_{j1} .

$$\Delta \vartheta_v = \frac{\Sigma \Delta P'_v}{S_{t\bar{e}l} \cdot \alpha_v} = \frac{16654,2}{1,239 \cdot 1100} = 12,21 \text{ K} \quad (195)$$

kde součinitel přestupu tepla α_v je odečten z grafu 6.60 a) v [4] a jeho hodnota je $1100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolního vzduchu $\Delta \vartheta_1$ se vypočítá podle následujícího vztahu.

$$\Delta \vartheta_1 = \Delta \vartheta_v + \Delta \vartheta_1' = 12,24 + 83,37 = 95,59 \text{ K} \quad (196)$$

Jelikož se jedná o přibližný výpočet musí být vypočtená hodnota minimálně o 10 % menší než dovolené oteplení pro danou tepelnou třídu.

Ještě je potřeba vypočítat požadovaný průtok vzduchu Q_v

$$Q_v = \frac{\Sigma \Delta P_v'}{1100 \cdot \Delta \vartheta_v'} = \frac{16654,2}{1100 \cdot 2 \cdot 12,21} = 0,619 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (197)$$

Poslední věcí k určení je průtok vzduchu dodávaný vnějším ventilátorem Q_v' . Otáčky vnějšího motoru se volili $n = 1000 \text{ min}^{-1}$.

$$Q_v' = 0,6 \cdot D_e^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,501^3 \cdot \frac{1000}{100} = 0,754 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (198)$$

Průtok vzduchu dodaný vnějším ventilátorem je větší než průtok potřebný pro chlazení stroje.

5.1.10 Pevnostní výpočet hřídele

Hřídel motoru nese hmotnost plechu rotoru a klece nakrátko a proto je důležité vypočítat průhyb hřídele, aby nedocházelo k tření mezi statorem a rotorem vlivem hmotnosti. V případě, že průhyb je velký musí se zvětšit vzduchová mezera nebo průřez hřídele.

Tab. 14 Rozměry pro výpočet průhybu hřídele

a_0 (mm)	376.15	d_{a0} (mm)	120
a_1 (mm)	102.15	d_{a1} (mm)	110
a_2 (mm)	65.15	d_{a2} (mm)	95
a_3 (mm)	20	d_{a3} (mm)	90
b_0 (mm)	368	d_{b0} (mm)	120
b_1 (mm)	94	d_{b1} (mm)	155
b_2 (mm)	64	d_{b2} (mm)	125
b_3 (mm)	41	d_{b3} (mm)	120
b_4 (mm)	21	d_{b4} (mm)	110

Nejprve se vypočítá hmotnost rotorového svazku m_{rFe}

$$\begin{aligned} m_{rFe} &= k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot l_{Fe2} \cdot \left[\frac{\pi \cdot (D_2^2 - D_i^2)}{4} - n_{avk2} \cdot \frac{\pi \cdot d_{avk2}^2}{4} - b_{d2} \cdot h_{d2} - b_{02} \cdot h_{02} \right] = \\ &= 0,97 \cdot 7650 \cdot 0,548 \cdot \left[\frac{\pi \cdot (0,348^2 - 0,12^2)}{4} - 8 \cdot \frac{\pi \cdot 0,04^2}{4} - \right. \\ &\quad \left. - 0,034 \cdot 0,0055 - 0,0025 \cdot 0,002 \right] = \\ &= 250,45 \text{ kg} \end{aligned} \quad (199)$$

Hmotnost klece rotoru m_{rk} je dána hmotností tyčí a kruhy nakrátko a vypočítá se následovně.

$$m_{rk} = \rho_{Cu} \cdot \left(Q_2 \cdot l_t \cdot b_t \cdot h_t + \frac{\pi \cdot (D_2^2 - D_{kn}^2)}{4} \cdot a_{kn} \right) =$$

$$= 8960 \cdot \left(59 \cdot 0,57 \cdot 0,0053 \cdot 0,0338 + 2 \cdot \frac{\pi \cdot (0,348^2 - 0,307^2)}{4} \cdot 0,015 \right) = 61,82 \text{ kg} \quad (200)$$

Celková hmotnost rotoru m_r je

$$m_r = m_{rFe} + m_{rk} = 250,55 + 61,82 = 312,37 \text{ kg} \quad (201)$$

Zatížení hřídele uprostřed rotoru je dáno hmotností rotoru m_r a výstředným magnetickým tahem F_e , který má při výstřednosti 10% hodnotu

$$F_e = 8350 \cdot D \cdot l_{Fe1} \cdot B_\delta^2 = 8350 \cdot 0,35 \cdot 0,548 \cdot 0,8^2 = 1024,76 \text{ kg} \quad (202)$$

a celkové zatížení hřídele F

$$F = m_r + F_e = 312,37 + 1024,76 = 1337,13 \text{ kg} \quad (203)$$

Před určením průhybu z pravé a levé strany se musí zvolit materiál hřídele a s ním i pevnost v tahu, který je dán materiálem. Byl zvolen materiál ocel 15230, která má pevnost v tahu $E = 780 \text{ MPa}$, a může se přejít k výpočtu průhybu. Pro výpočet průhybu budou následující vztahy uvedeny pouze v obecném tvaru. Rozměr jsou uvedeny v příloze IV.

Průhyb hřídele z levé strany se vypočte

$$y_1 = \frac{64 \cdot F}{3 \cdot \pi \cdot E} \cdot \frac{b_0}{l} \cdot \left[\frac{a_0^3 - a_1^2}{d_{a0}^4} + \frac{a_1^3 - a_2^2}{d_{a1}^4} + \frac{a_2^3 - a_3^2}{d_{a2}^4} + \dots \right] \quad (204)$$

Průhyb hřídele z pravé strany se vypočte

$$y_2 = \frac{64 \cdot F}{3 \cdot \pi \cdot E} \cdot \frac{a_0}{l} \cdot \left[\frac{b_0^3 - b_1^2}{d_{b0}^4} + \frac{b_1^3 - b_2^2}{d_{b1}^4} + \frac{b_2^3 - b_3^2}{d_{b2}^4} + \dots \right] \quad (205)$$

Výsledné průhyby $y_1 = 0,0181 \text{ mm}$ a $y_2 = 0,0168 \text{ mm}$ a určí se střední hodnota průhybu y_s

$$y_s = \frac{1}{2} \cdot (y_1 + y_2) = \frac{1}{2} \cdot (0,0181 + 0,0168) = 0,01745 \text{ mm} \quad (206)$$

6 Simulace navrženého motoru

Simulace se bude provádět v programu Ansys Maxwell. Tento program umožňuje simulaci nízkofrekvenčních elektromagnetických polí. Pro řešení využívá výpočetní metody MKP (metoda konečných prvků) pro analýzy, studie a optimalizace elektromechanických a elektromagnetických zařízení např. transformátory, motory, magnety, senzory atd. Dále umožňuje řešení v elektrického a elektromagnetického pole stacionárně, ve frekvenční nebo nestacionární v oblasti časové na 2D nebo 3D, pro který je pouze potřeba obecná geometrie.[20]

Ansys Maxwell nabízí tyto nástroje pro:

- tvorbu geometrie, která se může vytvořit s využitím databáze standardních komponentů používaných při návrhu elektrických strojů.
- import geometrii v CAD formátech.
- rozsáhlou databázi materiálů a přidávání nespecifikovaných materiálu popřípadě změnu parametrů stávajícího materiálu.
- umožňuje simulovat prvek s nelineárním materiálem jako jsou např. elektrotechnické plechy.
- umožňuje jednoduchou simulaci translačního a rotačního pohybu těles.
- hlavní výhodou tohoto programu je snadná orientace v uživatelském rozhraní a snadné použití.

6.1 Ansys RMxpert

Je program, který využívá analytických vztahů náhradního schématu pro výpočet parametrů a charakteristik elektrických strojů. Je možné, zde simulovat různé typy motoru např. asynchronní, synchronní, BLDC atd. Dále nabízí automatický návrh určitých konstrukčních částí stroje jako je např. některé rozměry satorové a rotorové drážky, satorové vinutí.[20]

Ansys RMxpert má mnoho výhod:

- jednoduché zadávání vstupních parametrů stroje např. frekvence, napětí, výkon, rozměry atd.
- z nastavených hodnot vypočítá základní data pro vyhodnocení parametrů stroje např. účinnost, ztráty, moment, účinník atd.
- obsahuje nástroje pro optimalizaci nebo parametrizaci navrženého motoru
- umožňuje export do Maxwell 2D, popřípadě 3D

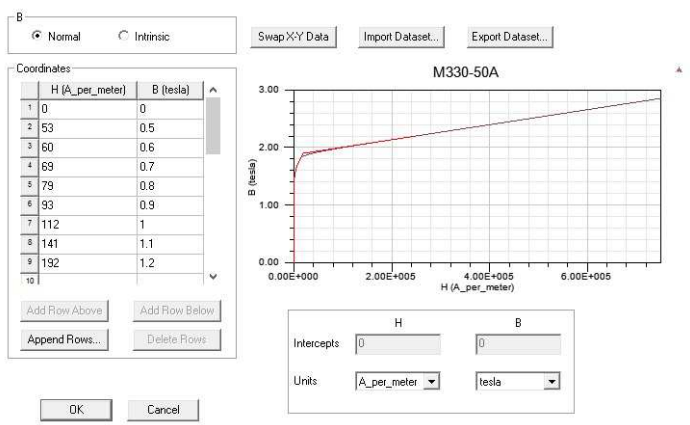
6.1.1 Nastavení hodnot

Pro simulaci parametru motoru byl zvolen třífázový asynchronní motor (Three-phase induction motor). Výsledek simulace je určení parametrů navrhnutého motoru. Bohužel se v tomto případě dá použít tento program k určení přibližných parametrů, protože některé parametry nešli zadat nebo jsou zadané s určitým přiblížením, a jedná se o kontrolu analytického výpočtu, zda v určených rozměrech nedošlo k chybě, která by vrátila celý analytický výpočet na začátek.

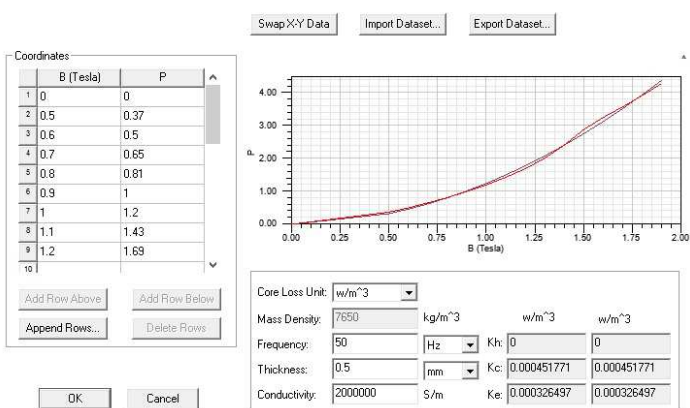
Jedním takovým případem přiblížení je vnější průměr satorového svazku. Z důvodu existujících axiálních ventilačních kanálků je vnější průměr větší. Pokud by se tento průměr zadal do parametrů v RMxpert bude indukce ve jhu satoru větší, protože není možnost přidání axiálních ventilačních kanálků. Opatřením k zachování přibližně stejné indukce ve jhu satoru je snížení

vnějšího průměru na hodnotu $D_e = 0,486$ m. To samé se dá říci o rotoru s jediným rozdílem a to zvětšení vnitřního průměru, tedy zvětšení průměru hřídele, na hodnotu $D_i = 0,1734$ m.

Dále se musel zadat materiál statorového a rotorového svazku. Tento materiál nebyl v knihovně materiálů a se musel do knihovny přidat. Přidané B-H a B-P charakteristika jsou znázorněna na následujících obrázcích. Tyto charakteristiky odpovídají tabulce v příloze I.

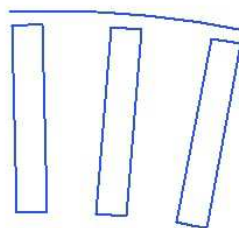


Obr. 21 B-H charakteristika M330-50A



Obr. 22 B-P charakteristika M330-50A

Drážky statoru v RMxprt se mohly nastavit jako v případě analytického návrhu. U rotorových drážek je zanedbáno otevření drážky b_0 a výška otevření drážky h_{02} , to má samozřejmě vliv na vypočtené parametry. Další nepřesností je průřez tyče, který odpovídá průřezu drážky viz. obr. 23. Zbylé změny byly uvedeny výše.



Obr. 23 Drážka rotoru v RMxprt

Poslední částí bylo nastavení počtu pólů, výkonu, napětí, otáček, provozní teploty a přídatných ztrát. Dále byly zvoleny třecí a ventilační ztráty, které dohromady tvoří ztráty mechanické. V tomto případě se mechanické ztráty rozdělily na polovinu.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name	Setup1			Machine Type	Three Phase Induction Motor		
Enabled	<input checked="" type="checkbox"/>			Number of Poles	6		
Operation ...	Motor			Stray Loss Factor	0.015		0.015
Load Type	Const Power			Frictional Loss	205	W	205W
Rated Out...	300000	W	300000W	Windage Loss	205	W	205W
Rated Volt...	600	V	600V	Reference Speed	975	rpm	
Rated Spe...	975	rpm	975rpm				
Operating ...	75	cel	75cel				

Obr. 24 Vstupní hodnoty pro simulaci

Problém byl nastavit správnou teplotu statorového vinutí, neboť program uvažuje nastavenou provozní teplotu po celý početní rozsah. Nepomáhá ani změnit vodivost mědi. Jedinou možností změny odporu je změna provozní teploty. To se však může nepříjemně projevit na správnosti výpočtů. Nakonec odpor statorového vinutí byl vypočten programem na hodnotu 0,0188 Ω .

Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce a porovnány s analyticky navrhnutým motorem.

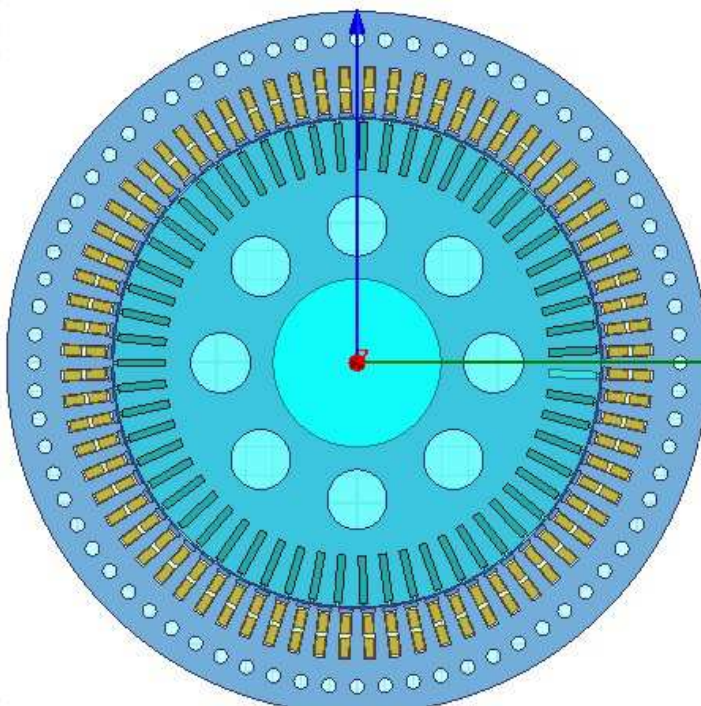
Tab. 15 Jmenovité hodnoty motoru

		Analyticky	RMxprt
Výkon	P_2 (kW)	300	300,054
Příkon	P_1 (kW)	316,373	316,186
Napětí	U_1 (V)	600	600
Proud	I_{1N} (A)	356,334	353,345
Moment	M_N (N·m)	2918,7	2905,1
Maximální moment	M_{MAX} (N·m)	6829,3	7237,1
Otáčky	n_N (min ⁻¹)	982,1	986,3
Skluz	s_N (%)	1,786	1,369
Skluz zvratu	s_{zvf} (%)	10	8
Celkové ztráty	ΔP (kW)	16,373	16,133
Účinnost	η (%)	94,828	94,898
Účinník	$\cos \varphi$ (-)	0,855	0,848
Poměrný záběrný proud	i_{zab} (-)	5,903	6,23
Poměrný záběrný moment	m_{zab} (-)	1,707	1,85
Poměrný maximální moment	m_{MAX} (-)	2,525	2,49

6.2 Maxwell 2D

Poslední částí diplomové práce byla simulace motoru v Maxwell 2D. Program Ansys RMxprt umožňuje převod vypočteného motoru do Maxwell 2D. To samozřejmě znamená, že veškeré rozměry musely být dodrženy podle analytického výpočtu a nepoužil se upravený model v předchozí kapitole. Nutno podotknout, že program převede analytický model s ohledem na symetrii stroje. V případě sudého počtu satorových nebo rotorových drážek převede pouze jeden pól motoru. To samozřejmě ničemu nevádí a urychluje to výpočet. V případě lichého počtu drážek už program převede celý model a výpočet je delší.

Převedený model motoru se musel ještě upravit a to přidáním axiálních ventilačních kanálků do satorového a rotorového svazku. Pomocí funkce Draw circle byl vložen kruh o průměru 10 mm do jha satoru a jeho umístění je patrné z obrázku. Následně se musel kruh 72x okopírovat kolem obvodu jha satoru pomocí funkce Duplicate around axis. Následně se vybral sator a všechny kruhy tvořící axiální ventilační kanálky a pomocí funkce Subtract došlo k odebrání těchto kruhů ze jha satoru a byly vytvořeny axiální ventilační kanálky. Tento postup se opakoval u axiálních ventilačních kanálků rotoru.



Obr. 25 Model motoru v Maxwell 2D

Další změna proběhla u odporu fází vinutí stroje, které se upravily na stejnou hodnotu jako v analytickém návrh.

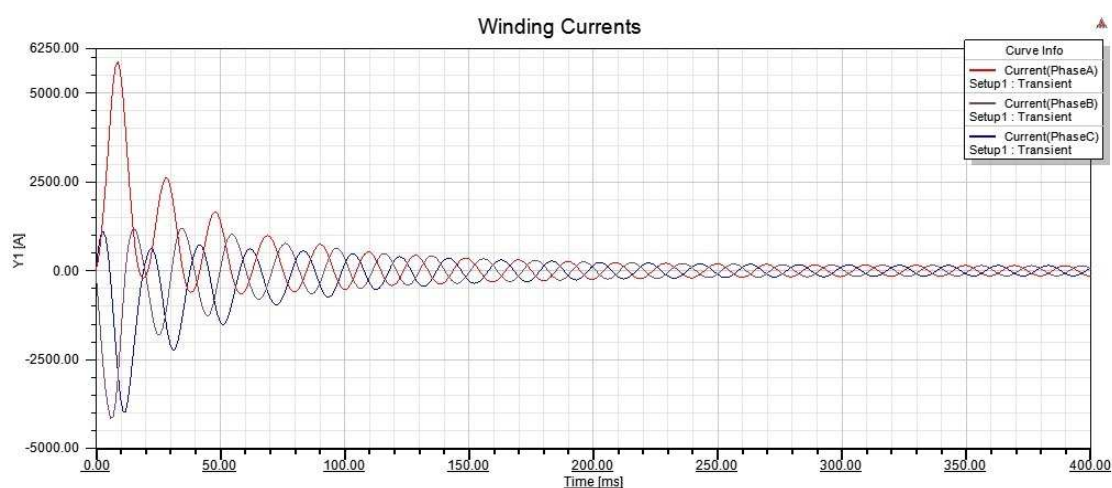
Model byl hlavně použit pro rozložení magnetické indukce a magnetických siločar motoru. Jsou zde simulovány tři stavy a to nakrátko, naprázdno a při jmenovitém zatížení a to jak pro nemagnetický klín, který bude v Maxwellu zadán jako vakuum, a magnetický klín ISOVAL 11/200 s relativní permeabilitou $\mu_r = 5,5$.

Pro nasimulování stavu nakrátko, naprázdno a při jmenovitém zatížení se v modelu musel upravit motion setup a to zadáním momentu setrvačnosti, tlumení soustavy a počáteční otáčky, které program vypočítá sám. Jediné co se musí zadávat, jsou počáteční otáčky pro stav naprázdno a jmenovitý stav.

6.2.1 Stav naprázdno

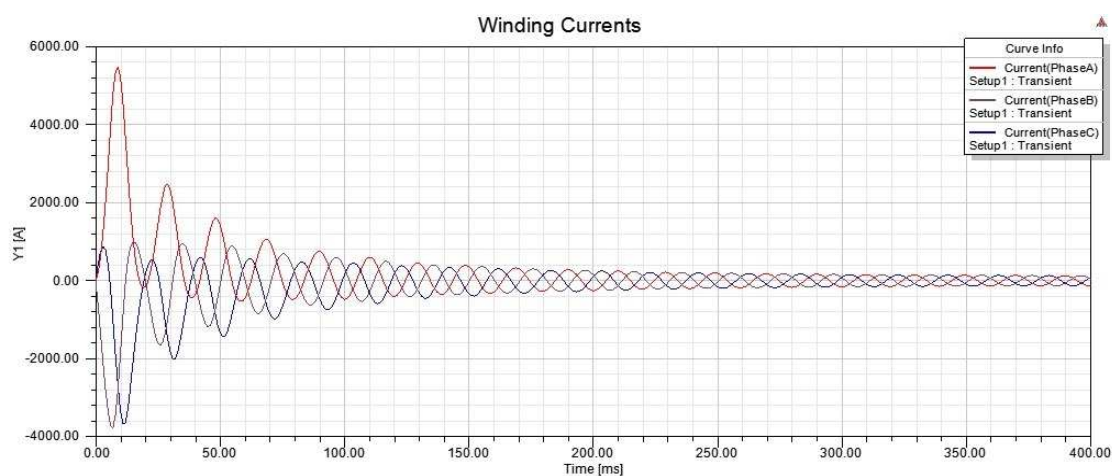
Další nastavení v motion setup se provedlo pro stav naprázdno. Momentem setrvačnosti a tlumení soustavy zůstalo stejné. Počáteční otáčky se nastavili na hodnotu 999 min^{-1} , tedy blízkou synchronním otáčkám.

Z průběhu jde vidět, že proudy jednotlivých fází dosahují mnoho násobku proudu jmenovitého při rozběhu, ale rychle dochází k zániku přechodného děje a ustálení maximálního proudu naprázdno na hodnotě 144 A v čase $t = 300 \text{ ms}$. Tomu odpovídá hodnota efektivní hodnoty proudu naprázdno 101,82 A a vůči proudu naprázdno, vypočteného u analytického návrhu, větší.



Obr. 26 Průběh proudu naprázdno ve satorovém vinutí pro nemagnetické klíny

Průběh proudu naprázdno pro magnetické klíny je obdobný jako pro nemagnetické. Jediný rozdíl je v ustálení přechodného děje. U magnetického klínu dojde k ustálení v čase $t = 380 \text{ ms}$. Maximální hodnota proudu naprázdno je 135,1 A a tomu odpovídá efektivní hodnota proudu naprázdno 95,53 A.



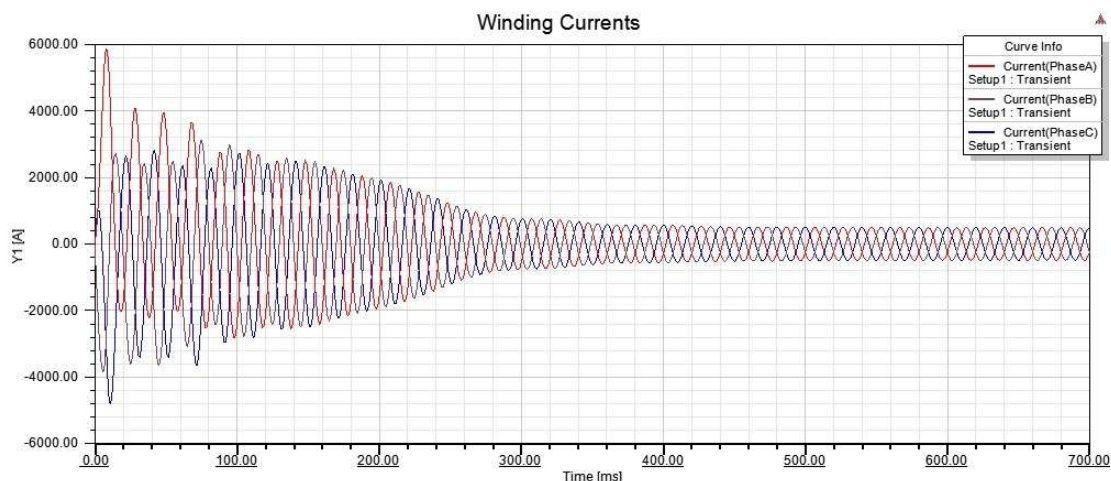
Obr. 27 Průběh proudu naprázdno ve satorovém vinutí pro magnetické klíny

Průběhy moment, zátěžového momentu a otáček nemá smysl uvádět, neboť by šlo pouze vidět, že momenty jsou nulové a otáčky se blíží synchronním otáčkám pro ustálený stav. Při rozběhu by se dosahovalo stejného průběhu jako u jmenovitého stavu, ale docházelo by k rychlejšímu odeznění přechodného děje a ustálení hodnot uvedených v první větě odstavce.

6.2.2 Jmenovitý stav

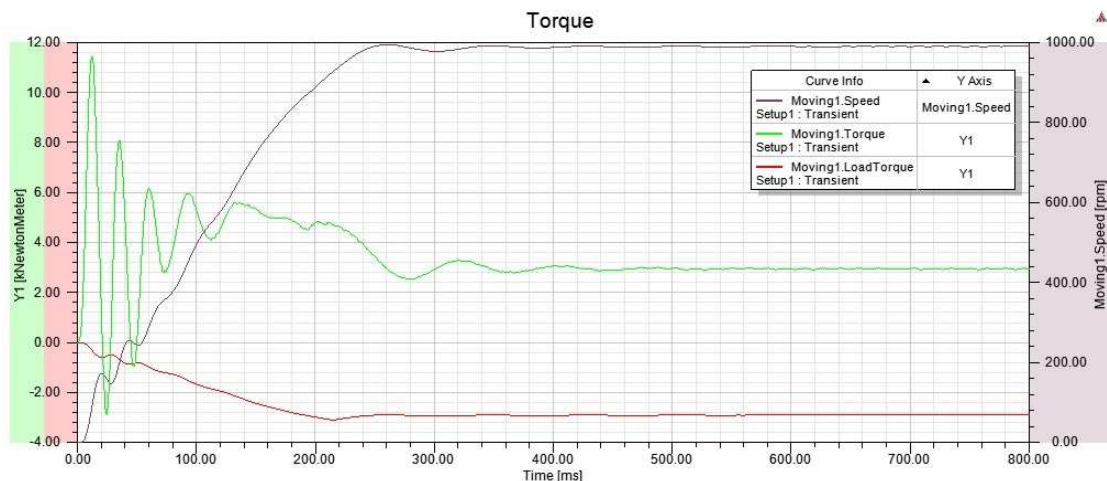
Pro jmenovitý stav došlo pouze k změně počátečních otáček na 0 min^{-1} a nastavení zatěžovacího moment, který se nastavil podmínkou, pokud je rychlost otáčení menší než $96,866 \text{ rad}^{-1}$ zvyšuje zatěžovací moment lineárně. Jinými slovy, s rostoucí rychlostí se zvyšuje i zátěžový moment, do okamžiku než se rychlost ustálí na konstantní hodnotě.

Následující průběhy udávají rozběh motoru z nulových otáček do jmenovitých. Tomu odpovídá průběh proudu v statorovém vinutí. Průběh proudu na obr. 28 je simulován pro nemagnetické klíny. Je z něho vidět, že začátek rozběhu je doprovázen vyššími harmonickými a stejnosměrnou složkou. V čase $t = 500 \text{ ms}$ dochází k ustálení hodnot proudu. Maximální hodnota činní $I_{\text{MAX}} = 498,3 \text{ A}$ a to odpovídá jmenovité hodnotě $I_{\text{IN}} = 352,35 \text{ A}$. Tato hodnota je menší než vypočtená hodnota proudu v analytickém návrhu.



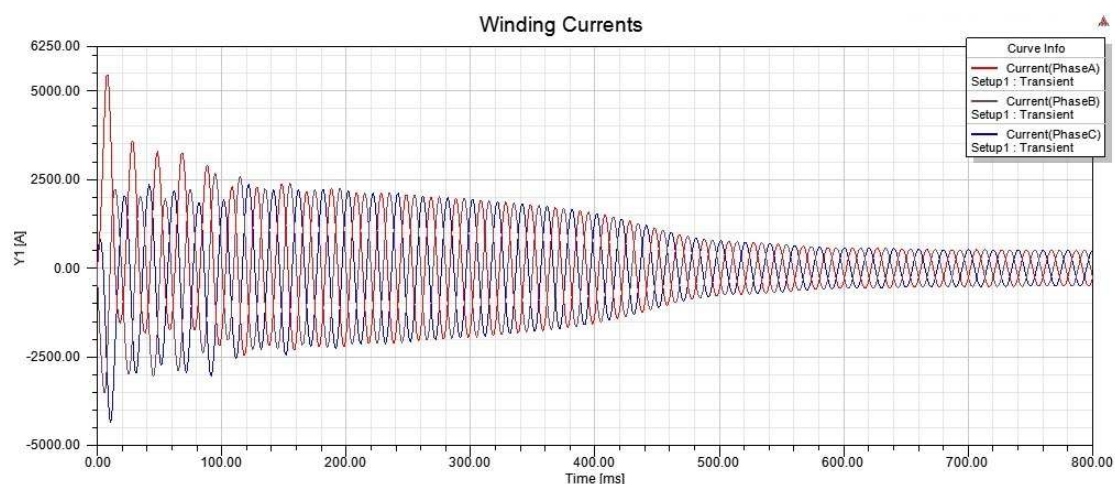
Obr. 28 Průběh proudu ve vinutí při jmenovitém zatížení pro nemagnetické klíny

Další průběh zobrazuje moment, zátěžového moment a otáčky motoru. Moment motoru má vrcholovou hodnotu $11,5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ a díky tomuto dochází k urychlování soustavy až do jeho jmenovitého stavu. K ustálení momentu motoru došlo v čase $t = 500 \text{ ms}$ na hodnotu $2943,5 \text{ N}\cdot\text{m}$. Proti momentu motoru působí zatěžovací moment, který v první části průběhu roste téměř lineárně do doby $t = 215 \text{ ms}$ a poté se udržuje na konstantní hodnotě $2\,897 \text{ N}\cdot\text{m}$. Moment motoru je o přibližně $25 \text{ N}\cdot\text{m}$ větší než analyticky vypočtený. Otáčky motoru se ustálily na hodnotě $989,13 \text{ min}^{-1}$.



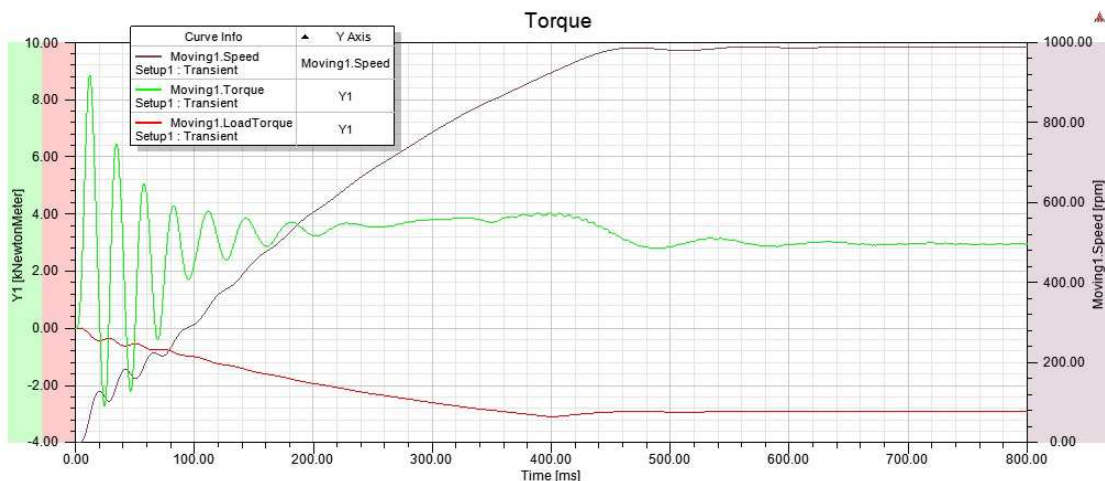
Obr. 29 Průběh momentu a otáček motoru pro nemagnetické klíny.

Z průběhu proudů (obr. 30) ve satorovém vinutí pro magnetické klíny je vidno, že při rozběhu motoru dochází opět k zatížení vyššími harmonickými a stejnosměrnými složkami. Po odeznění přechodného děje, v čase $t = 750$ ms, se hodnota proudu ustálí na maximální hodnotě $I_{\text{MAX}} = 504,4$ A a jmenovitý proud činní $I_{\text{IN}} = 356,66$ A. Tento proud je téměř totožný s proudem, který vyšel v analytickém výpočtu.



Obr. 30 Průběh proudu ve vinutí při jmenovitém zatížení pro magnetické klíny

Průběh momentu, zatěžovacího momentu a otáček pro magnetický klín je znázorněn na následujícím obrázku. Pro rozběh je situace stejná jako u nemagnetických klínů. Jediným rozdílem je ustálení hodnot a hodnoty jednotlivých proměnných. Moment motoru se ustálil až při čase $t = 700$ ms na hodnotě $2947,8$ N·m. Oproti tomuto působí zatěžovací moment o hodnotě 2899 N·m, ale až od doby $t = 500$ ms. Otáčky motoru se ustálily na hodnotě $988,12$ min⁻¹.

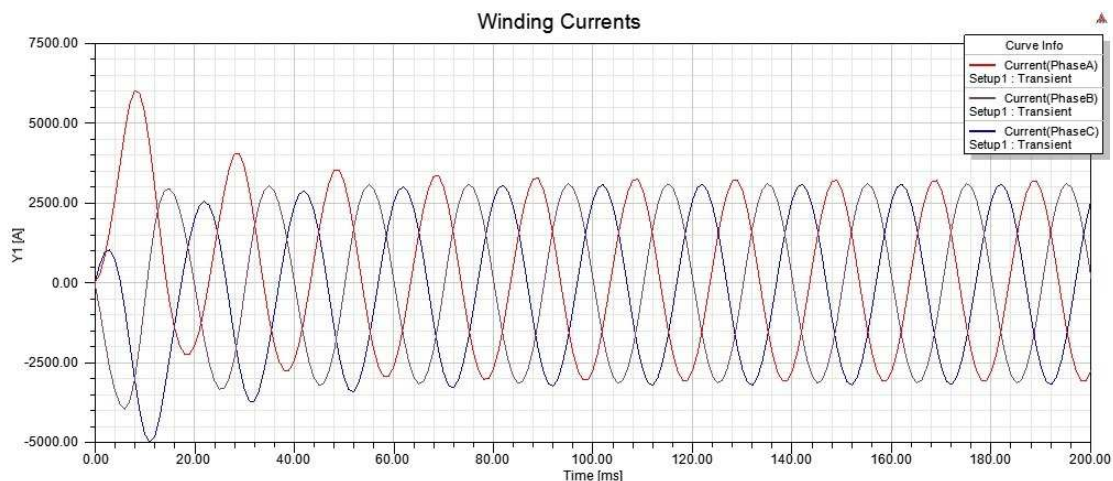


Obr. 31 Průběh momentu a otáček motoru pro magnetické klíny.

6.2.3 Stav nakrátko

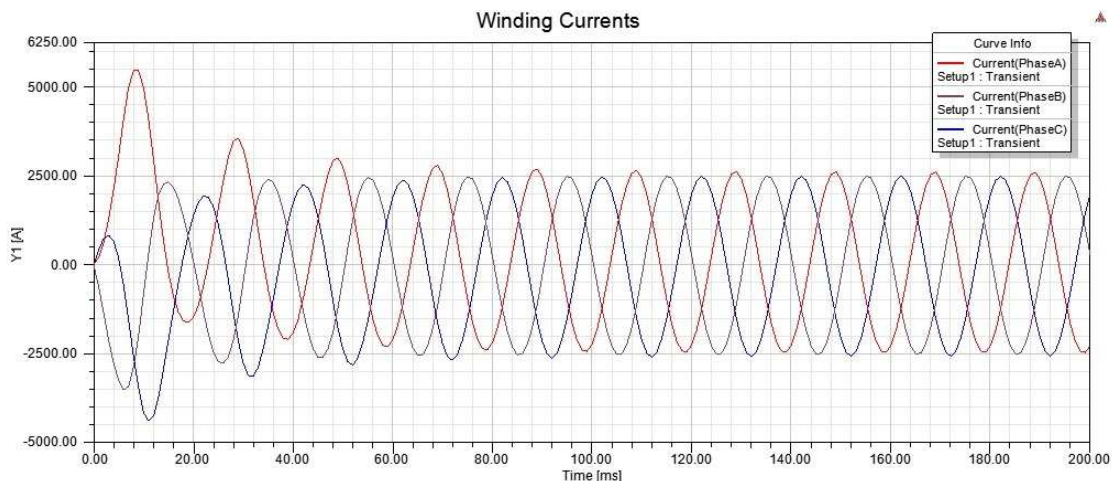
Pro stav nakrátko se musel motion setup odstranit a program nemohl vypočítat průběh momentu v závislosti na čase, ale to je logické, protože v stavu nakrátko je hřídel zabrzdněna a rotor motoru se neotáčí. To má samozřejmě za následek zvýšení proudu na mnoho násobek proudu jmenovitého.

Průběh proudů nakrátko pro nemagnetické klíny je znázorněn na obr. 32. Z něho je možné odečíst hodnoty proudů nakrátko po každou fázi zvlášť. Maximální hodnota pro fázi A je 3206 A, fázi B je 3107 A a fázi C je 3090 A. Střední hodnota těchto proudů je 3134,3 A a to odpovídá efektivní hodnotě proudu 2216,3 A. Tato hodnota proudu je přibližně o 115 A větší než v analytickém výpočtu.



Obr. 32 Průběh proudu nakrátko ve statorovém vinutí pro nemagnetické klíny

Proud nakrátko v případě použitých magnetických klínů je menší, jak ukazuje průběh proudu nakrátko z obr. 33. Maximální hodnota proudu nakrátko pro fázi A je 2610 A, fázi B je 2487,5 A a fázi C = 2486,7 A. Střední hodnota maximální ho proudu nakrátko je 2528,1 A. Tomu odpovídá efektivní hodnota proudu nakrátko 1787,6 A, která je podstatně nižší než proud nakrátko vypočtený z analytického výpočtu.



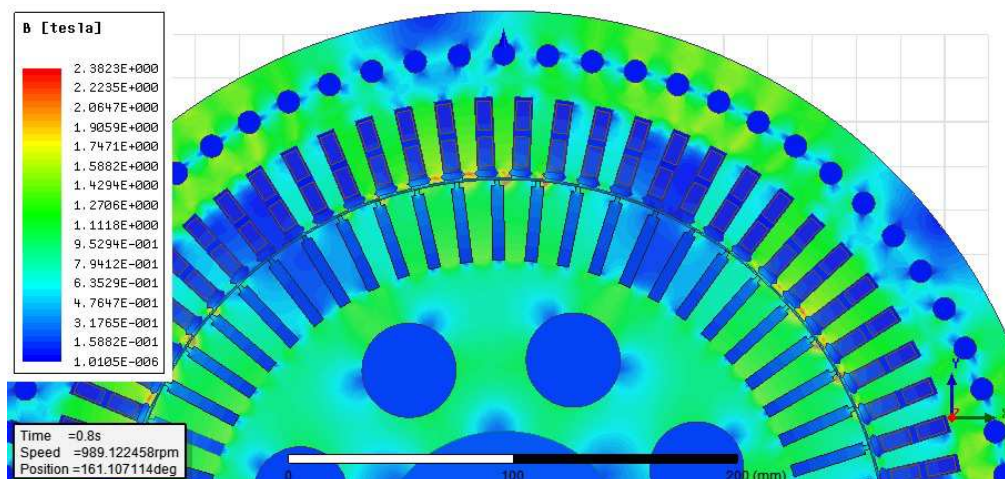
Obr. 33 Průběh proudu nakrátko ve satorovém vinutí pro magnetické klíny

6.2.4 Magnetická indukce v Maxwell 2D

V programu Maxwell 2D se udělala simulace magnetické indukce v obvodu motoru pro nemagnetický a magnetický klín.

Následný obrázek je ze simulace motoru s nemagnetickým klínem. U oblasti zubu mezi klíny drážky je vidět, že dochází k přesycení magnetického obvodu na hodnotu přesahující 2 T. Hodnota indukce v zubu statoru se pohybovala v rozmezí 1 T v nejširším místě a v nejužším místě, tedy u vzduchové mezery, 1,7 T. Hodnota indukce v jhu statoru se pohybuje v rozmezí 1,4 až 1,5 T. U ventilačních kanálků se hodnota indukce pohybuje v rozmezí 1,6 až 1,7 T.

Rozložení indukce v magnetickém obvodu rotoru je následovná. Hodnota indukce v zubu rotoru je v rozmezí 1,1 v nejširším místě zubu a 1,7 v nejužším místě zubu. Indukce ve jhu rotoru se pohybuje okolo 1 T a v oblasti ventilačních kanálků se pohybuje okolo hodnoty 1,1 až 1,2 T, ale pouze v části bližší rotorovým drážkám.

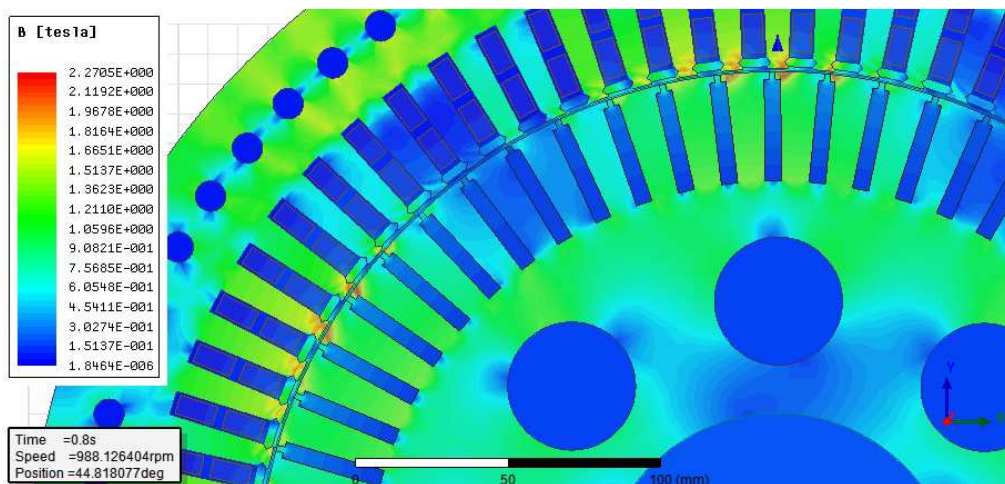


Obr. 34 Magnetická indukce pro ustálený stav pro nemagnetický klín

Na následujícím obrázku je rozložení magnetické indukce v simulovaném motoru s magnetickými klíny. Můžeme si povšimnout, že indukce ve jhu statoru okolo ventilačních kanálků dosahuje hodnoty okolo 1,6 T. Tato hodnota se především nachází uprostřed pólu a pouze mezi

drážkou a ventilačním kanálkem. Mezi ventilačními kanálky je hodnota indukce okolo 1,3 T. V případě zubů statoru je magnetická indukce v největší šířce rovna 1,2 T. S postupným zmenšováním šířky zubu, indukce roste na hodnotu 1,6 T. V neužším místě drážky, tedy v místě klínu dochází k přesycení a díky magnetickému klínu není toto přesycení větší než 1,9 T.

V magnetickém obvodu rotoru dochází k přesycování v oblasti výšky otevření drážky. Je to z důvodu větší intenzity magnetického pole v této oblasti. Hodnota indukce v tomto místě je okolo 2 T. V zubu rotoru se indukce pohybuje okolo 1,1 T pro maximální šířku zubu a okolo 1,6 T pro minimální šířku. Ve jhu rotoru je indukce v rozmezí od 1 do 0,8 T.



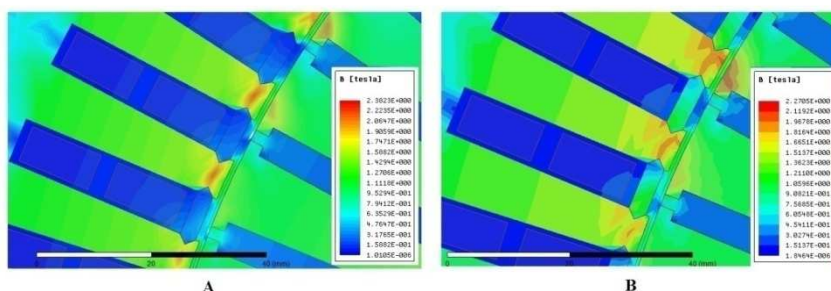
Obr. 35 Magnetická indukce pro ustálený stav pro magnetický klín

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty indukce ve jhu statoru a rotoru a zubu statoru a rotoru pro analytický výpočet, RMxpert, a simulaci z Maxwell 2D pro nemagnetický a magnetický klín. Nutno dodat, že hodnoty v tabulce jsou střední hodnoty.

Tab. 16 Magnetická indukce pro jmenovitý stav

Model	Analytický výpočet	RMxpert	Nemagnetický klín	Magnetický klín
B_{j1} (T)	1,495	1,403	1,45	1,45
B_{z1av} (T)	1,426	1,407	1,4	1,4
B_{j2} (T)	0,951	0,925	1	0,9
B_{z2av} (T)	1,442	1,367	1,4	1,35

Na následujícím obrázku je porovnání magnetické indukce v zubu motoru pro nemagnetický a magnetický klín.



Obr. 36 Rozložení magnetické indukce v zubu statoru (A - nemagnetický klín; B - magnetický klín)

7 Závěr

V diplomové práci byl proveden elektromagnetický výpočet trakčního asynchronního motoru s klecí nakrátko o výkonu 300 kW s ohledem na požadované parametry. Analytický návrh byl proveden s použitím literatury v [4].

Z vypočteného návrhu mě vyšly rozměry motoru následující: statorový svazek má délku 0,548 m, vrtání statoru 0,35 m a vnější průměr statoru je 0,501 m. Typ statorové drážky jsem volil M a počet drážek je 72. Jednotlivé rozměry jsou uvedeny na výkrese č. 1-1001-001. Jedna fáze statorového vinutí je tvořena 32 závitů. Celkový počet vodičů v drážce je 16. Navíc se rozměry jednoho vodiče volili tak, aby se neprojevoval skin efekt a nedošlo k překročení zvolené proudové hustoty. Rozměr vzduchové mezery byl vypočítán a poté zvětšen na hodnotu 1 mm s ohledem na průhyb hřídele. Rotorový svazek má stejnou délku jako statorový. Jeho vnější průměr činní 0,348 m, vnitřní průměr je 0,12 m a počet drážek je 59 a rozměry drážky jsou uvedeny na výkrese č. 1-1001-002. V obou svazích se nacházejí ventilační axiální kanálky. Materiál klece nakrátko je měď a klec je tvořena 59 tyčemi a dvěma kruhy nakrátko.

Následně se provedl elektromagnetický návrh, tedy určení magnetických indukcí a intenzity jednotlivých částí motoru. Z něhož šlo částečně rozpoznat, zda zvolené rozměry budou dobré nebo špatné.

Pro výpočet odporů se uvažovala pracovní teplota 145 °C a vypočítala se hodnota odporu pro statorové vinutí a klec nakrátko. Reaktance motoru závisí na zvoleném typu statorové a rotorové drážky a na vliv natočení rotorových drážek. Natočení drážek snižuje amplitudu vyšších harmonických a snižuje hlukovou hladinu motoru. Při návrhu se uvažovalo natočení drážky o 0,5 t_{d2} a to vedlo ke zvětšení reaktancí a k zhoršení účinnků motoru.

Další část se věnovala určení ztrát motoru. Jako první se určili ztráty v železe. Součástí výpočtu ztrát bylo určení účinnosti a účinník, neboť se tyto hodnoty změnily vlivem typu drážky a použitého materiálu vinutí a klece nakrátko. Ze zatěžovacích charakteristik se určily jmenovité hodnoty motoru, které se liší od hodnot zvolených na začátku. Jmenovité hodnoty jsou uvedeny v tabulce 13. a hodnota jmenovitého proudu vyšla 356,66 A, která byla potřebná pro výpočet joulových ztrát. Následně se mohly vypočítat celkové ztráty a určit účinnost motoru, který vyšla 0,948. Jmenovitý účinník a jmenovité otáčky vyšly 0,855 a 982,14 min⁻¹.

Ze zatěžovacích charakteristik vyplývá, že proud I_{IN} je větší než vypočtený na začátku a to přibližně o 15 A. V tom okamžiku by se měl výpočet vrátit na začátek a přezkontrolovat rozměry vodičů, tyče a kruhu nakrátko, aby splňovaly podmínku proudové hustoty, která byla zvolena pro určení rozměrů. Z tohoto důvodu jsem zvolil větší rozměry vodiče vinutí a tyče a proto vyšla proudová hustota ve vodiči a tyči menší. V kruhu nakrátko je proudová hustota větší asi o 0,10 A·mm⁻², ale pořád je splněna podmínka, že proudová hustota v tyči je větší než v kruhu nakrátko.

Po výpočtu rozběhových charakteristik se dosáhlo určení poměrného záběrného proudu a momentu a momentu zvratu. Hodnota poměrného záběrného proudu vyšla 5,903 a záběrného momentu 1,707. Pokud by bylo zapotřebí zvětšit tyto hodnoty, musel by se změnit materiál klece nakrátko např. hliník nebo mosaz. To by samozřejmě sebou neslo zvýšení ztrát motoru a tedy snížení účinnosti. Navíc by se zvětšil proud ve statorovém vinutí a opět by se musela provést kontrola rozměrů statorového vinutí, tyče a kruhu nakrátko. Poměrná hodnota momentu zvratu vyšla pro

měděnou klec nakrátko 2,525 pro skluz zvratu 10%. Pokud by se opět změnil materiál klece, došlo by ke snížení toho momentu a omezení k maximální napájecí frekvence motoru.

Dále se určila maximální napájecí frekvence motoru, která byla odečtena z obr. 20 a její hodnota činí 115 Hz. Za touto frekvencí už dochází k omezení momentem zvratu. Této frekvenci odpovídají maximální otáčky motoru 2300 min^{-1} . Při správně zvoleném převodu a průměru kol může lokomotiva poháněná tímto motorem dosáhnout maximální rychlosti $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, ale optimálně se hodí pro lehké posunovací lokomotivy s maximální rychlostí do $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

V rámci návrhu se udělal i kontrolní výpočet předběžného oteplení. Výsledné oteplení muselo vyjít minimálně o 10 % menší než dovolené oteplení pro teplotní třídu 200. Jelikož se motor nachází ve venkovním prostředí s uvažovanou maximální okolní teplota 40°C a tudíž je dovolené oteplení 160 K. Střední oteplení statorového vinutí vyšlo 95,59 K, což splňuje podmínku o 10% menší než dovolené. Součástí oteplení bylo i určení průtoku chladícího vzduchu do motoru. Potřebná hodnota pro chlazení vzduchu byla vypočtena $0,619 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Poté se musel určit vnější ventilátor, který by takový průtok vzduchu dodával. Byl zvolen s otáčkami 1000 min^{-1} a dodávaný průtok chladícího vzduchu je $0,754 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Průtok dodávaný vnějším ventilátorem je větší než potřebný a bude mít za následek snížení středního oteplení statorového vinutí. Dodávané chladící medium bude do motoru vstupovat a vystupovat pomocí otvorů v kostře viz. výkres 1-1001-011. Vstup a výstup do motoru by měl být opatřen prachovým filtrem, který bude umístěn ve strojovně, aby mohlo docházet k jeho údržbě.

Poslední částí analytického výpočtu je výpočet průhybu hřídele, který je důležitý z hlediska dostatečně velké vzduchové mezery, aby nedocházelo k tření mezi statorovým a rotorovým svazkem. Výsledné prohnutí hřídele bylo vypočteno na hodnotu 0,01745 mm, což činí asi 1,745 % rozměru vzduchové mezery.

Následně se provedla simulace pro zjištění parametrů v Maxwell RMxprt. Bohužel se při této simulaci musela změnit výška jha statoru a rotoru, neboť nešlo nastavit axiální ventilační kanálky v statoru a rotoru. Axiální ventilační kanálky v rotoru jdou nastavit pomocí funkce vent, bohužel mi výpočet po nastavení kanálků nešel spustit. Výšky jha statoru a rotoru se nastavili na takovou hodnotu, aby magnetická indukce byla přibližně stejná jako v případě analytického výpočtu. Další nepřesností byl odpor vinutí, který byl větší vůči analytickému výpočtu a to ovlivňuje výsledné hodnoty. Hodnoty ze simulace se můžou brát pouze jako informativní, zda v analytickém návrhu nedošlo k podstatné chybě, která by znamenala změnu důležitého parametru v analytickém návrhu jako je např. vrtání statoru, rozměry drážek, atd. Z tabulky 15 jsou jmenovité hodnoty, vypočtené v analytickém výpočtu, podobné jako v případě simulace. Může se tedy konstatovat, že zvolené rozměry motoru, drážek, vzduchové mezery, vinutí a klece nakrátko jsou dobře zvolené.

Poslední částí diplomové práce byla simulace v Maxwell 2D. Pro tuto simulaci jsem zvolil dva typy simulace motoru a to s nemagnetickými a magnetickými klíny pro simulované stavy naprázdno, nakrátko a jmenovitý stav. Naštěstí jdou v Maxwellu 2D nastavit rozměry motoru stejné jako u analytického výpočtu, a proto jsou výsledky mnohem přesnější než v případě RMxprt. Odpor jednotlivých vinutí byl také nastaven na stejnou hodnotu jako u analytického výpočtu.

Pro nemagnetické klíny vyšla hodnota proudu naprázdno 101,82 A. Tato hodnota je přibližně o 2 A větší než u analytického výpočtu. To nejspíše je způsobeno nepřesnostmi při určování magnetické intenzity v jednotlivých částech magnetického obvodu. Pro stav nakrátko byla střední

hodnota proudu nakrátko určena na 2216,3 A, která je větší než pro analytický výpočet. Poslední simulací byl jmenovitý stav, který se prováděl od nulových do jmenovitých otáček. Na obr. 28 je průběh proudu ve všech fázích. Při rozběhu motoru dochází k velkému proudovému rázu, který s časem zaniká a po odeznění přechodového děje se ustálí. Ustálená hodnota proudu byla odečtena 352,35 A. Jmenovité hodnoty momentu a otáček jsou následovné. Hodnota momentu je 2943,5 N·m a hodnota otáček motoru 989,13 min⁻¹.

Hodnoty proudů v jednotlivých stavech pro magnetické klíny jsou menší než pro nemagnetické klíny až na výjimku jmenovité hodnoty proudu. Je to z důvodu, že magnetické klíny snižují záběrný proud, zvyšují účinník, snižují zátěžový proud a snižují ztráty v železe. Navíc přispívají k snížení magnetizačního proudu a zvyšují účinnost motoru, tedy zlepšují magnetické poměry v obvodu. Hodnota proudu naprázdno byla odečtena 95,53 A, která je nižší než vypočtená v analytickém výpočtu. Hodnota proudu nakrátko byla také menší 1786,6 A. Jmenovitá hodnota proudu byla odečtena 356,66 A a je v podstatě stejná jako v případě analytického výpočtu. Navíc doba ustálení je větší než v případě nemagnetických klínů. Jmenovité hodnoty momentu a otáček motoru byly odečteny z příslušného grafu a jejich hodnoty jsou: hodnota momentu činní 2947,8 N·m a hodnota otáček motoru je 988,12 min⁻¹.

Nakonec se v Maxwellu 2D udělalo rozložení magnetické indukce pro oba případy. Z obr. 34 a 35 jsou hodnoty v jednotlivých částech motoru přibližně stejné. Akorát rozložení magnetické indukce v oblasti zubu u klínů je zcela jiné. V případě nemagnetických klínů hodnota magnetické indukce přesahuje 2 T v této oblasti. U magnetických klínů je tato hodnota menší a činní maximálně 1,9 T. Je to dáno tím, že magnetické klíny přispívají k lepšímu rozložení magnetické toku v této oblasti. V tabulce 16 jsou zapsány hodnoty magnetické indukce pro všechny typy výpočtu. Nejvíce se analytickému výpočtu přiblížila simulace s nemagnetickými klíny, protože se při analytickém výpočtu elektromagnetického obvodu uvažovalo s nemagnetickými klíny.

Součástí diplomové práce je výkresová dokumentace, která je uvedena v příloze VII a je tvořena 12 výkresy. Asi nejdůležitějším výkresem je kompletní sestava motoru viz. 1-1001-012. Na tomto výkrese jsou totiž znázorněny pouze dva rozměry, které určují, zda jsem se vešel do požadovaných rozměrů či nikoliv. Na výkrese je délka motoru 845 mm a je tedy o 5 mm menší než maximální možná délka. Průměr motoru je 601 mm a je tedy velká rezerva oproti maximální možné výšce. Pokud by se chtělo docílit zmenšení délky motoru, muselo by se změnit vrtání statoru a to by znamenalo přepočítat celý analytický návrh.

8 Citace

- [1] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-707-8857-7.
- [2] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje* 2. 1. vyd. Praha: Československá akademie věd, 1982. ISBN 509-21-857.
- [3] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje*. Praha: Academia, 1980.
- [4] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [5] KEPPERT, Svetozar. *Projektování elektrických strojů*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1990. ISBN 80-7078-010-X.
- [6] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [7] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce II.: vozidla s asynchronním trakčním motorem*. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-813-8.
- [8] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce III: Plynulá regulace cize buzeného motoru*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009.
- [9] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce II: Přehled problematiky*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009.
- [10] LATA, Michael. *Konstrukce kolejových vozidel II: Plynulá regulace cize buzeného motoru*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-719-4696-6.
- [11] NAGAMANI, C. a R. SOMANATHAM. *An Alternative to squirrel cage induction motor for electric traction for Indian Railways: a Theoretical cost saving Approach.*, 4. ISSN 2778-1676.
- [12] *Motor-12.jpg* [online]. [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/obrazky/elektronika/motor-12.jpg>
- [13] *Elektrická trakce - Trakční mechanika, trakční charakteristiky*. Educon [online]. ZČU FEL KEV, 2005 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015050201>
- [14] *Product catalog 2012: TRACTION MOTOR*. Studylib.net [online]. 2012 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://studylib.net/doc/18490839/inspired-by-move---%C5%A1koda-transportation-as>
- [15] *Trakční motor 7 Ev*. Idnes [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: https://1gr.cz/fotky/idnes/11/031/org/RJA3984e7_Fotky_trakcniho_motoru_7Ev_1.jpg
- [16] *ATM090. SKD Trade a.s.* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: http://www.skd.cz/firma/tocive_stroje/ATM090.pdf

- [17] *Traktionsmotorenparameter. Prago!mex* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: http://www.pragoimex.cz/files/traktionsmotorenparameter_a66f6fd520263fedf96e5008e76e49bb.pdf
- [18] *POJEZD LOKOMOTIV PROVENIENCE CZ LOKO a. s. Vlaky.net* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.vlaky.net/upload/images/reports/003534/Pojezd.pdf>
- [19] *Moderní trakční pohony. Railvolution* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.railvolution.net/czechraildays/2009/seminare/kv06.pdf>
- [20] *Techsoft engineering* [online]. 2012 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.techsoft-eng.cz/>
- [21] *První patní lokomotivy. TRAINS WEB 2.0* [online]. 2005 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://trainsweb.wz.cz/>
- [22] *STUDIE ULOŽENÍ TRAKČNÍHO MOTORU NA VALIVÝCH LOŽISKÁCH* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.kll.cz/pages/trakcni%20motor.htm>

9 Přílohy

Seznam příloh		Počet listů
I	Datový list plechů M330-50A	1
II	Zatěžovací charakteristika	1
III	Rozběhová charakteristika	1
IV	Rozměry pro výpočet průhybu hřídele	1
V	Štítek motoru	1
VI	Schéma zapojení vinutí	1
VII	Výkresová dokumentace	13

Příloha I - Datový list plechů M330-50A

	Garantiewerte nach DIN EN 10106 <i>Guaranteed values according to DIN EN 10106</i>	Sortentypische Mittelwerte ThyssenKrupp Steel AG <i>Typical mean values ThyssenKrupp Steel AG</i>
Ummagnetisierungsverlust bei 50Hz <i>Core loss at 50Hz</i>		
1,0* T	1,35 W/kg	1,33 W/kg
1,5 T	3,30 W/kg	3,07 W/kg
Magnetische Polarisation bei <i>Magnetic polarization at</i>		
2500 A/m	1,49 T	1,53 T
5000 A/m	1,60 T	1,63 T
10000 A/m	1,70 T	1,75 T

*Die Größe des Ummagnetisierungsverlustes bei 1,0 T ist ein Anhaltswert und dient zur Information

*The core loss value at 1.0 T is a reference value and is for information purposes only

f = 50Hz								
J T	H A/m			μ_a	P_s W/kg			S_s VA/kg
	0°	90°	0°/90°	0°/90°	0°	90°	0°/90°	0°/90°
0,5	35	73	53	7528	0,30	0,43	0,37	0,56
0,6	39	83	60	7913	0,41	0,58	0,50	0,76
0,7	43	96	69	8081	0,55	0,74	0,65	1,00
0,8	49	110	79	8015	0,69	0,92	0,81	1,28
0,9	57	128	93	7698	0,86	1,12	1,00	1,62
1,0	69	152	112	7111	1,05	1,34	1,20	2,07
1,1	89	188	141	6231	1,27	1,58	1,43	2,66
1,2	122	255	192	4977	1,50	1,86	1,69	3,59
1,3	195	430	313	3311	1,80	2,21	2,01	5,48
1,4	423	1049	698	1597	2,16	2,65	2,41	11,24
1,5	1284	2715	1932	619	2,61	3,12	2,88	32,02
1,6	3259	5447	4284	298	2,99	3,46	3,25	80,02
1,7	6312	9210	7750	176	3,30	3,77	3,57	162,65
1,8	10670	14297	13318	109	3,61		3,92	312,35
1,9	17280	21628	19610	78			4,28	480,83

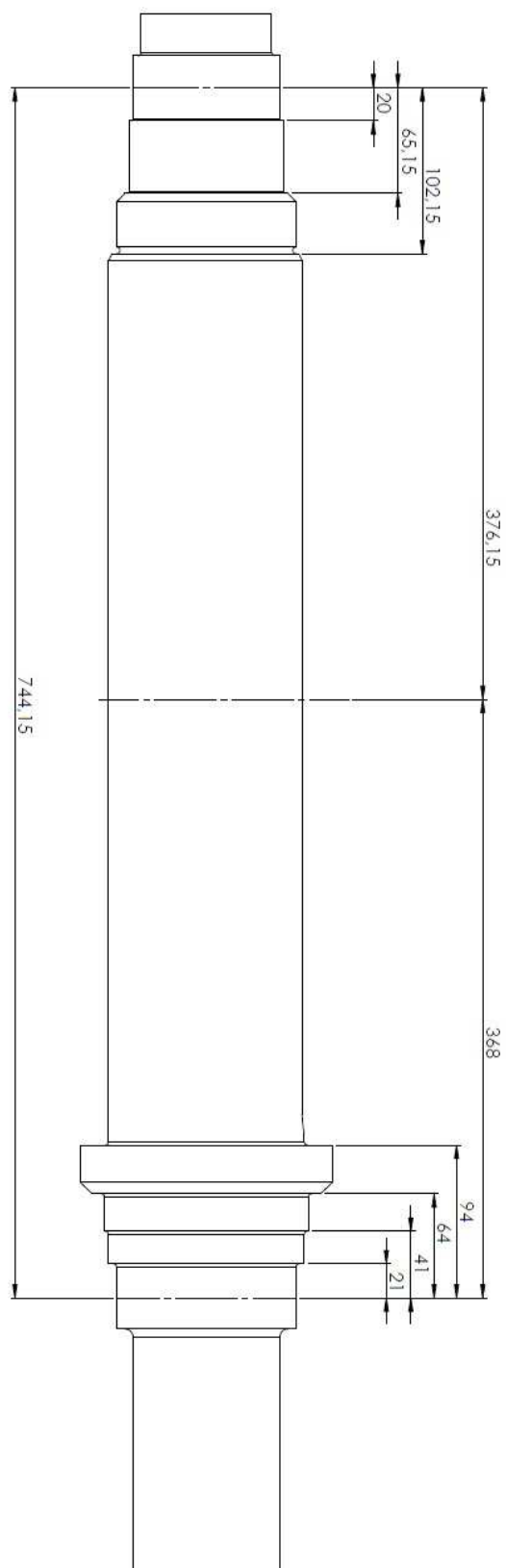
Příloha II - Zatěžovací charakteristiky

	Jednotky	Skluz														
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,0316	1,15	1,2	1,3	1,4	1,5
		0,0034	0,0052	0,0069	0,0086	0,0104	0,0122	0,0138	0,0156	0,0173	0,0178	0,0199	0,0208	0,022508	0,024239	0,025971
	Ω	5,390	3,594	2,695	2,156	1,797	1,540	1,348	1,198	1,078	1,045	0,937	0,898	0,829	0,770	0,719
	Ω	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ω	5,409	3,612	2,714	2,175	1,815	1,559	1,366	1,216	1,097	1,064	0,956	0,917	0,848	0,789	0,737
	Ω	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
	Ω	5,417	3,624	2,730	2,195	1,840	1,587	1,399	1,253	1,137	1,105	1,002	0,965	0,899	0,844	0,796
	A	63,947	95,576	126,883	157,805	188,282	218,260	247,689	276,524	304,728	313,503	345,777	359,112	385,242	410,639	435,292
	-	0,998	0,997	0,994	0,991	0,987	0,982	0,977	0,971	0,965	0,962	0,954	0,950	0,943	0,935	0,926
	-	0,055	0,083	0,110	0,137	0,163	0,189	0,214	0,239	0,264	0,271	0,299	0,311	0,333	0,355	0,377
	A	66,717	98,116	128,983	159,194	188,634	217,199	244,800	271,358	296,809	304,613	332,802	344,198	366,071	386,705	406,096
	A	103,377	107,744	113,770	121,388	130,516	141,063	152,929	166,010	180,197	184,892	203,305	211,439	228,270	245,763	263,810
	A	123,037	145,724	171,989	200,195	229,384	258,987	288,642	318,111	347,227	356,334	389,987	403,954	431,410	458,192	484,262
	A	65,898	98,491	130,753	162,618	194,025	224,917	255,243	284,958	314,022	323,065	356,323	370,064	396,991	423,164	448,569
	kW	69,334	101,965	134,043	165,439	196,034	225,720	254,403	282,003	308,453	316,563	345,858	357,701	380,432	401,875	422,027
	kW	0,814	1,142	1,591	2,156	2,830	3,608	4,481	5,443	6,485	6,830	8,180	8,777	10,011	11,292	12,614
	kW	0,229	0,512	0,901	1,394	1,985	2,668	3,435	4,282	5,200	5,504	6,695	7,221	8,310	9,442	10,610
	kW	0,190	0,267	0,372	0,504	0,661	0,843	1,047	1,272	1,515	1,596	1,911	2,051	2,339	2,638	2,947
	kW	3,677	4,364	5,308	6,498	7,920	9,562	11,408	13,440	15,644	16,373	19,231	20,493	23,104	25,817	28,615
	kW	65,657	97,600	128,735	158,941	188,113	216,158	242,996	268,563	292,809	300	326,627	337,208	357,328	376,059	393,412
	-	0,947	0,957	0,960	0,961	0,960	0,958	0,955	0,952	0,949	0,948	0,944	0,943	0,939	0,936	0,932
	η	0,542	0,673	0,750	0,795	0,822	0,839	0,848	0,853	0,855	0,855	0,853	0,852	0,849	0,844	0,839

Příloha III - Rozběhové charakteristiky

Vztah	Jednotky	Skuz																			
		1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,0622
ξ	-	2,859	2,787	2,713	2,636	2,557	2,476	2,392	2,305	2,215	2,120	2,022	1,918	1,808	1,692	1,566	1,430	1,279	1,107	0,904	0,713
φ	-	1,800	1,750	1,660	1,550	1,500	1,420	1,350	1,200	1,100	1,000	0,880	0,760	0,640	0,520	0,350	0,280	0,180	0,120	0,059	0,023
hr	m	0,012	0,012	0,013	0,013	0,014	0,014	0,014	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,021	0,022	0,025	0,027	0,029	0,030	0,032	0,033
kr	-	2,800	2,750	2,660	2,550	2,500	2,420	2,350	2,200	2,100	2,000	1,880	1,760	1,640	1,520	1,350	1,280	1,180	1,120	1,059	1,023
Kr	-	2,545	2,502	2,425	2,330	2,287	2,219	2,159	2,030	1,944	1,858	1,755	1,652	1,549	1,446	1,300	1,240	1,154	1,103	1,051	1,020
kd	-	0,540	0,545	0,550	0,575	0,600	0,610	0,625	0,650	0,680	0,725	0,750	0,775	0,820	0,900	0,920	0,930	0,940	0,950	0,950	0,970
R'2 ξ	Ω	0,045	0,044	0,043	0,041	0,040	0,039	0,038	0,036	0,034	0,033	0,031	0,029	0,027	0,025	0,023	0,022	0,020	0,019	0,018	0,018
λd_2^{ξ}	-	2,435	2,445	2,455	2,506	2,558	2,578	2,609	2,660	2,721	2,814	2,865	2,916	3,008	3,172	3,213	3,234	3,254	3,275	3,275	3,315
Kx	-	0,796	0,798	0,800	0,811	0,823	0,827	0,834	0,845	0,858	0,878	0,889	0,900	0,920	0,956	0,965	0,969	0,973	0,978	0,978	0,987
X'2 σ_{ξ}	Ω	0,145	0,146	0,146	0,148	0,150	0,151	0,152	0,154	0,157	0,160	0,162	0,164	0,168	0,175	0,176	0,177	0,178	0,179	0,179	0,180
I'2 bez nasyceni	A	1354	1350	1346	1335	1322	1316	1307	1297	1283	1263	1252	1239	1219	1188	1177	1159	1136	1091	999	832
Fdov	A	14415	11291	11263	11168	11062	11010	10937	10849	10732	10569	10469	10366	10200	9936	9846	9699	9506	9128	8358	6956
Bf6	T	8,420	6,595	6,578	6,523	6,461	6,431	6,388	6,337	6,269	6,173	6,115	6,055	5,958	5,803	5,751	5,665	5,553	5,332	4,882	4,063
kn	-	1,400	1,383	1,366	1,350	1,334	1,317	1,301	1,285	1,268	1,252	1,236	1,219	1,203	1,186	1,170	1,154	1,137	1,121	1,105	1,100
Zp	-	0,375	0,400	0,405	0,410	0,415	0,417	0,420	0,422	0,424	0,426	0,428	0,430	0,435	0,440	0,450	0,460	0,470	0,480	0,500	0,580
Δb_02	m	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,008	0,007
$\Delta \lambda d_2 n$	-	1,047	1,040	1,039	1,037	1,036	1,035	1,034	1,034	1,033	1,032	1,032	1,031	1,030	1,028	1,025	1,021	1,018	1,014	1,006	0,970
λd_{2en}	-	1,387	1,405	1,416	1,469	1,522	1,543	1,575	1,626	1,688	1,781	1,833	1,885	1,979	2,144	2,188	2,212	2,236	2,260	2,268	2,345
λd_{if2n}	-	0,375	0,400	0,405	0,410	0,415	0,417	0,420	0,422	0,424	0,426	0,428	0,430	0,435	0,440	0,450	0,460	0,470	0,480	0,500	0,580
X'2 σ_{ξ}^n	Ω	0,079	0,081	0,082	0,084	0,086	0,087	0,088	0,091	0,093	0,097	0,099	0,101	0,105	0,112	0,114	0,115	0,117	0,118	0,119	0,125
Δb_01	m	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003
$\Delta \lambda d_1 n$	-	0,168	0,163	0,162	0,161	0,161	0,160	0,160	0,159	0,159	0,159	0,158	0,158	0,157	0,156	0,154	0,152	0,150	0,148	0,144	0,128
$\lambda d_1 n$	-	1,428	1,432	1,433	1,434	1,435	1,435	1,436	1,436	1,437	1,437	1,437	1,438	1,439	1,440	1,442	1,443	1,445	1,447	1,451	1,468
λd_{if1n}	-	0,217	0,232	0,235	0,237	0,240	0,241	0,243	0,244	0,246	0,247	0,248	0,249	0,252	0,255	0,261	0,266	0,272	0,278	0,290	0,336
X1 σn	Ω	0,082	0,083	0,083	0,083	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,085	0,085	0,085	0,085	0,086	0,088
c1pn	-	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019
ap	Ω	0,063	0,065	0,066	0,067	0,069	0,071	0,073	0,074	0,076	0,078	0,081	0,084	0,087	0,092	0,096	0,107	0,121	0,150	0,206	0,311
bp	Ω	0,163	0,165	0,166	0,169	0,171	0,172	0,174	0,176	0,179	0,182	0,185	0,187	0,191	0,198	0,201	0,202	0,204	0,206	0,207	0,216
I'2	A	1979,9	1948,2	1935,6	1907,7	1875,9	1860,0	1837,9	1815,5	1785,1	1744,3	1718,5	1691,6	1649,3	1586,5	1559,4	1514,9	1460,2	1362,5	1185,0	914,0
I1	A	2014,4	1982,8	1970,2	1942,9	1911,4	1895,5	1873,6	1851,6	1821,6	1781,4	1755,9	1729,2	1687,4	1625,5	1598,5	1553,4	1497,8	1398,3	1216,9	941,0
iz	-	5,903	5,811	5,774	5,694	5,602	5,555	5,491	5,426	5,339	5,221	5,146	5,068	4,945	4,764	4,685	4,552	4,390	4,098	3,566	2,758
rnz	-	1,707	1,711	1,727	1,708	1,722	1,751	1,783	1,762	1,767	1,759	1,774	1,798	1,803	1,780	1,804	1,948	2,106	2,336	2,525	2,341

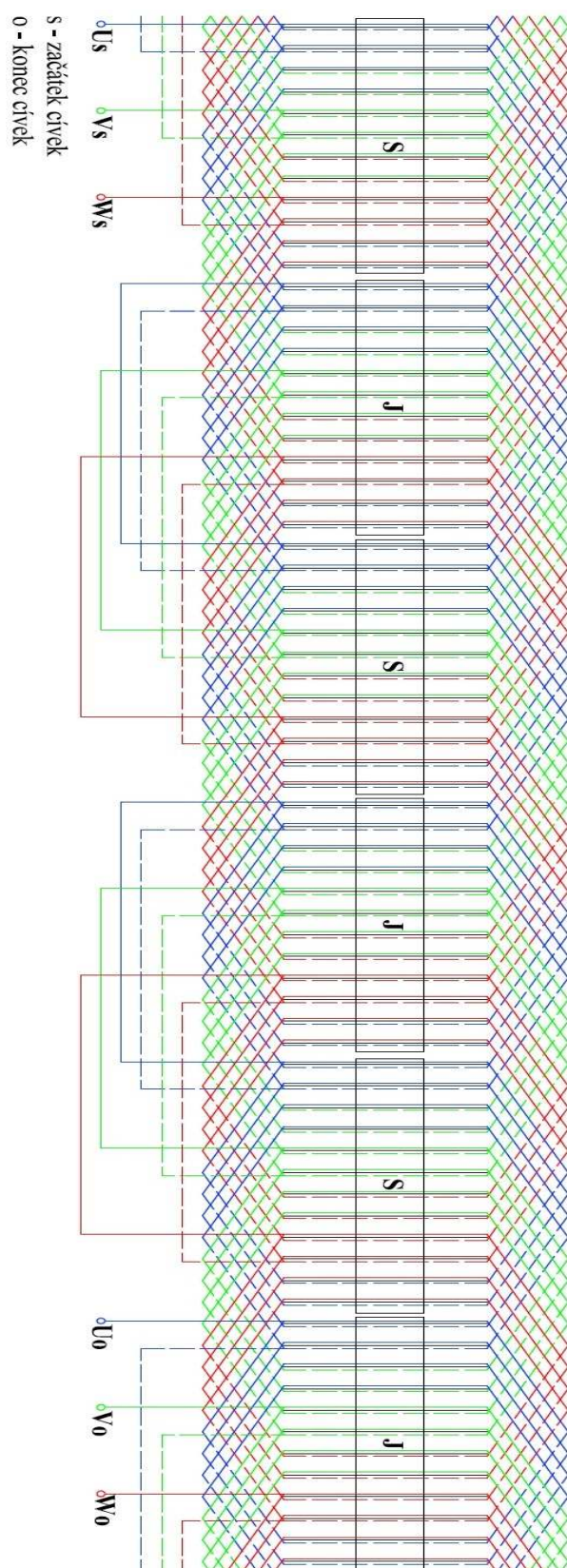
Příloha IV - Rozměry pro výpočet průhybu hřídele



Příloha V - Štítek

	○
Typ	TAM 1001
Napětí	600 V
Proud	356 A
Otáčky	982 min ⁻¹
Moment	2918 Nm
Frekvence	50 Hz
Stupěn krytí	IP 56
Výrobce	
Rok výroby	
	○

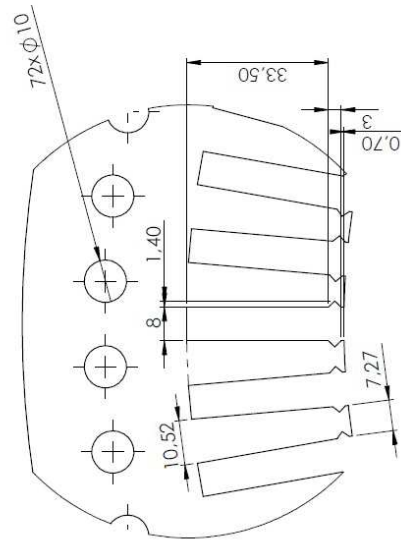
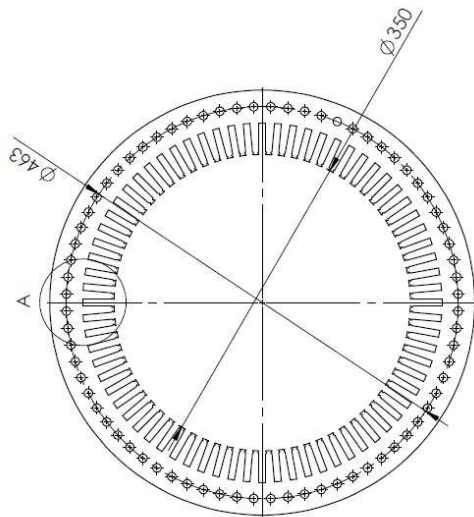
Příloha VI - Schéma zapojení vinutí



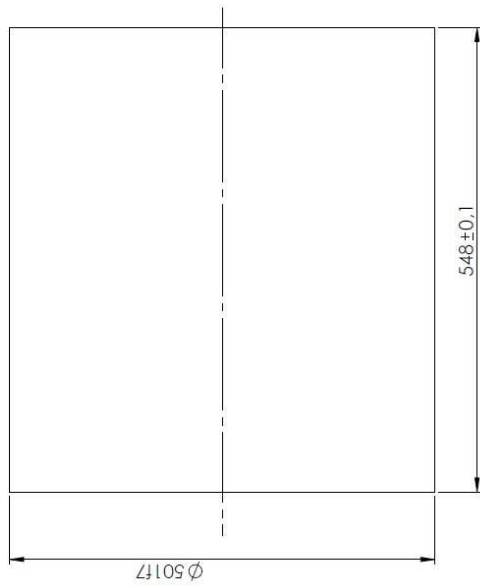
Příloha VII - Výkresová dokumentace

Seznam výkresů:

1.	1-1001-001 - Statorový svazek	87
2.	1-1001-002 - Rotorový svazek.....	88
3.	1-1001-003 - Vinutí.....	89
4.	1-1001-004 - Tyč rotoru.....	90
5.	1-1001-005 - Kruh nakrátko.....	91
6.	1-1001-006 - Hřídel.....	92
7.	1-1001-007 - Ložiskový štít - přední.....	93
8.	1-1001-008 - Ložiskový štít - zadní	94
9.	1-1001-009 - Pření štít	95
10.	1-1001-010 - Zadní štít.....	96
11.	1-1001-011 - Kostra - svařovaná.....	97
12.	1-1001-012 - Sestava motoru	98

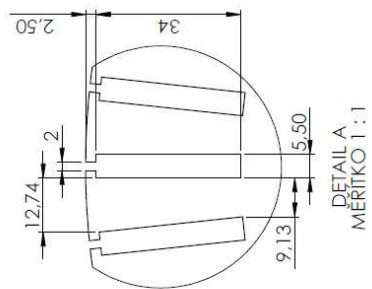


DETAIL A
MÉRITO 1:1



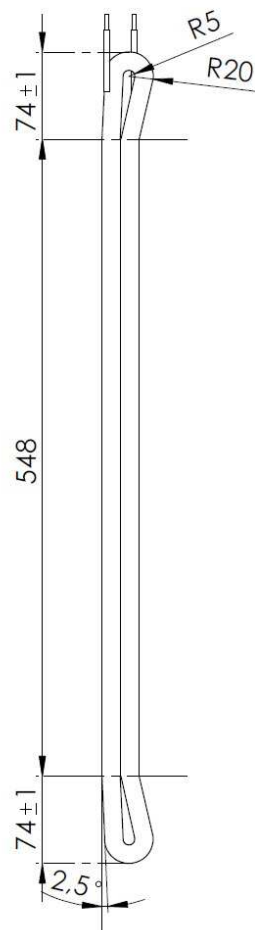
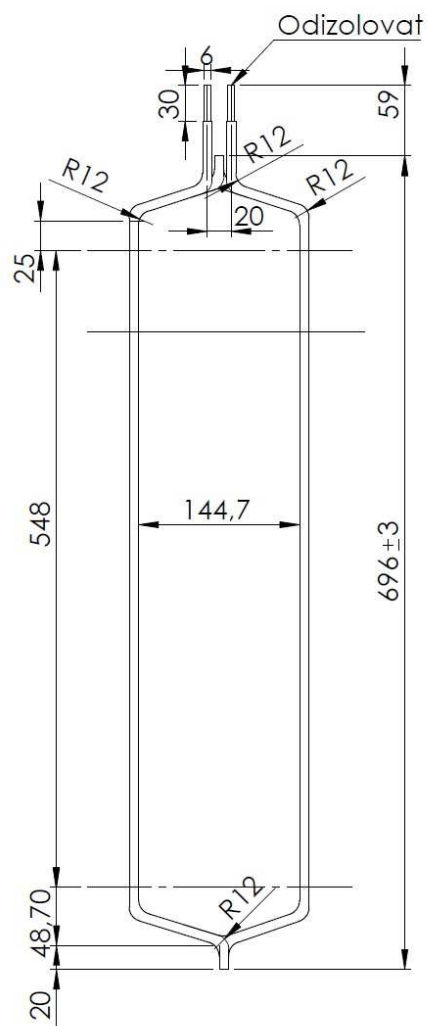
Počet drážek: 72
Počet plechů: 1096

[illegible]

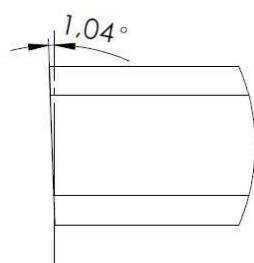
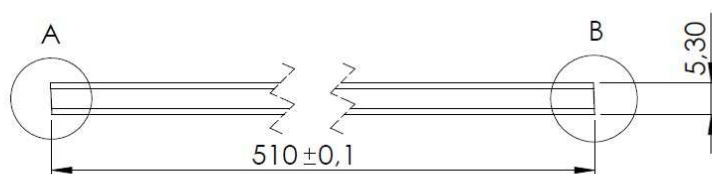
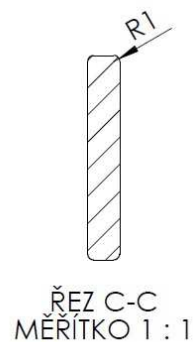
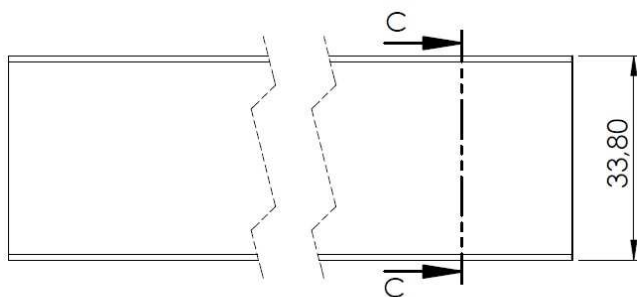


Počet drážek: 59
Natočení dráčky: 9,27 mm
Počet elektrotechnických plechů: 1096

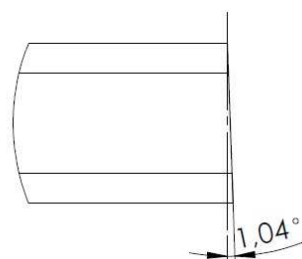
[illegible]



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:				OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU				ZMĚNA			
NAVRHL		NÁZEV		PODPIS		DATUM								NÁZEV: Vinutí	
PŘEZKOUSEL															
SCHVÁLIL															
VÝROBA															
Z. JAKOSTI								MATERIÁL:		Č. VÝKRESU 1-1001-003				A4	
								Měď							



DETAIL A
MĚŘITKO 5 : 1

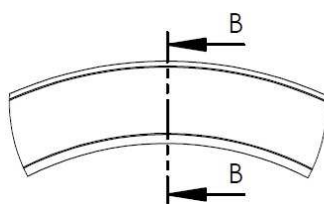
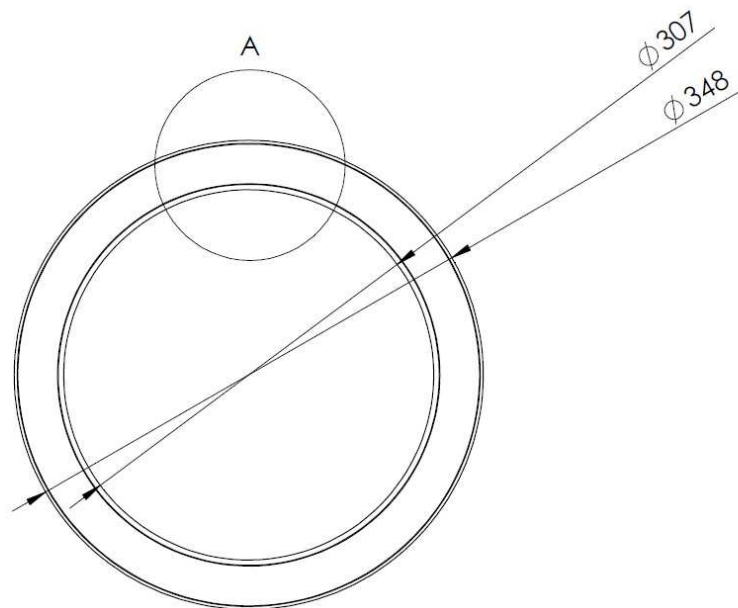


DETAIL B
MĚŘITKO 5 : 1

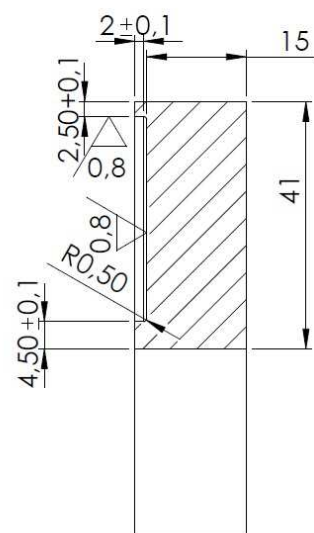
Počet tyčí: 59

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: ISO 2768-m LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:				OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU		ZMĚNA		
	NÁZEV	PODPIS	DATUM					NÁZEV: Tyč rotoru				
NAVRHL	Adam Rýznar											
PŘEZKOUSEL												
SCHVÁLIL												
VÝROBA												
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:				Č. VÝKRESU		1-1001-004		A4
				Elektrovodná měď								
				HMOTNOST: 0.81 kg				MĚŘITKO: 1:1		LIST 1 Z 1 LISTŮ		

12,5



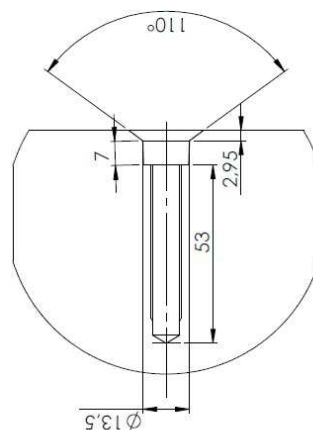
DETAIL A
MĚŘITKO 1 : 3



ŘEZ B-B
MĚŘITKO 1 : 1

Počet kruhů nakrátko: 2

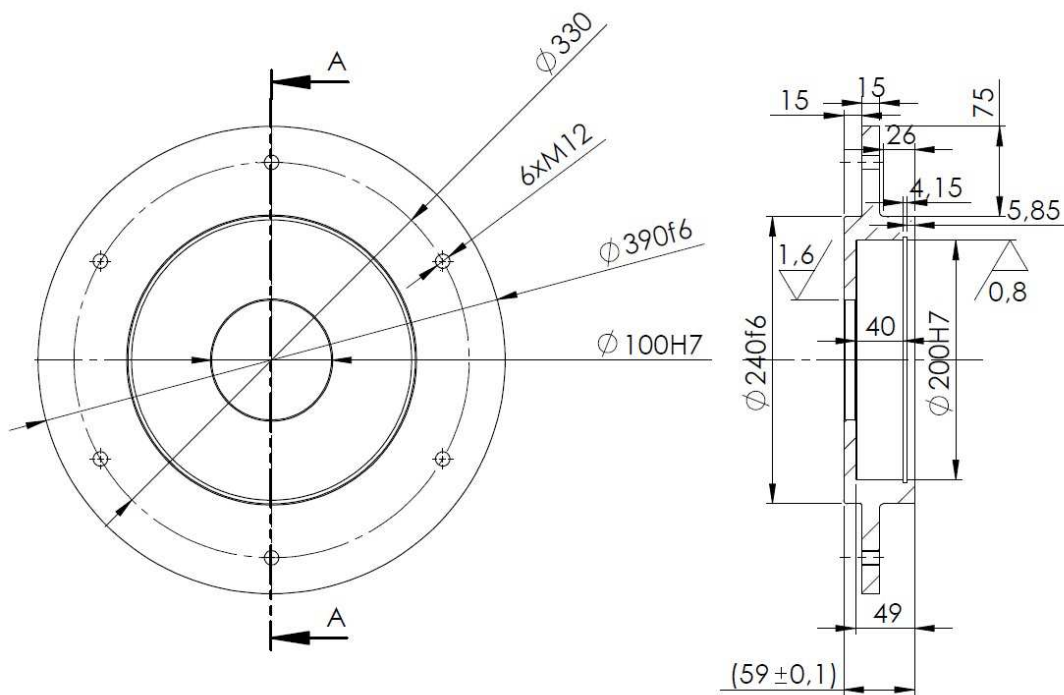
POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: ISO 2768-m LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NAVRHL		NÁZEV		PODPIS		DATUM		NÁZEV:	
PŘEZKOUSEL		Kruh nakrátko							
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		Č. VÝKRESU		A4	
				Elektrovodná měď		1-1001-005			
				HMOTNOST: 2,9 kg		MĚŘITKO: 1:5		LIST 1 Z 1 LISTŮ	



č. výkresu	1-1001-006	A3
název kresby	LIST 1 Z 1 LISTŮ	

[illegible]

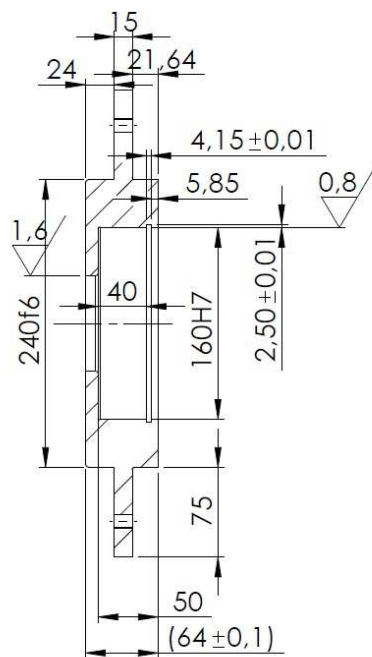
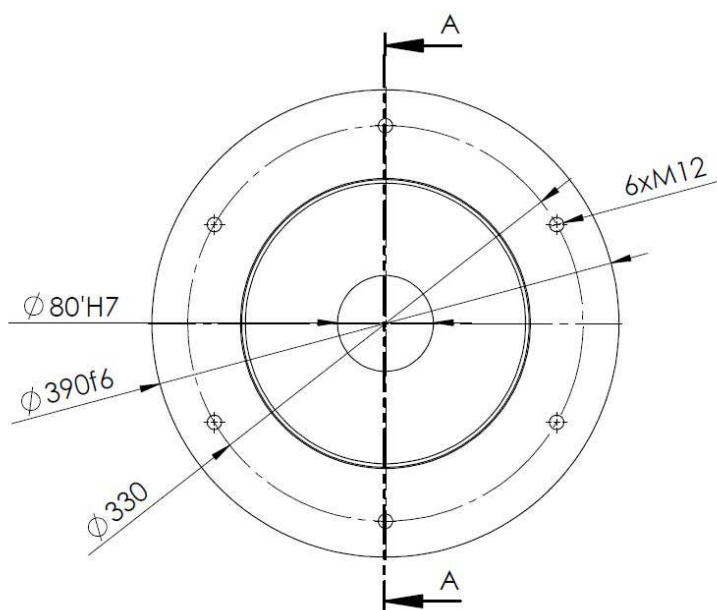
3,2/



ŘEZ A-A

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: ISO 2768-m LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:				OPRACOVÁNÍ:				ODSTRANIT OSTŘE HRANY				NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU				ZMĚNA			
		NÁZEV	PODPIS	DATUM				NÁZEV: Ložiskový štít - přední											
NAVRHL		Adam Rýznar																	
PŘEZKOUSE																			
SCHVÁLIL																			
VÝROBA																			
Z. JAKOSTI					MATERIÁL:			Č. VÝKRESU				1-1001-007				A4			
					11500														
								HMOTNOST: 16,8 kg				MĚŘITKO:1:5				LIST 1 Z 1 LISTŮ			

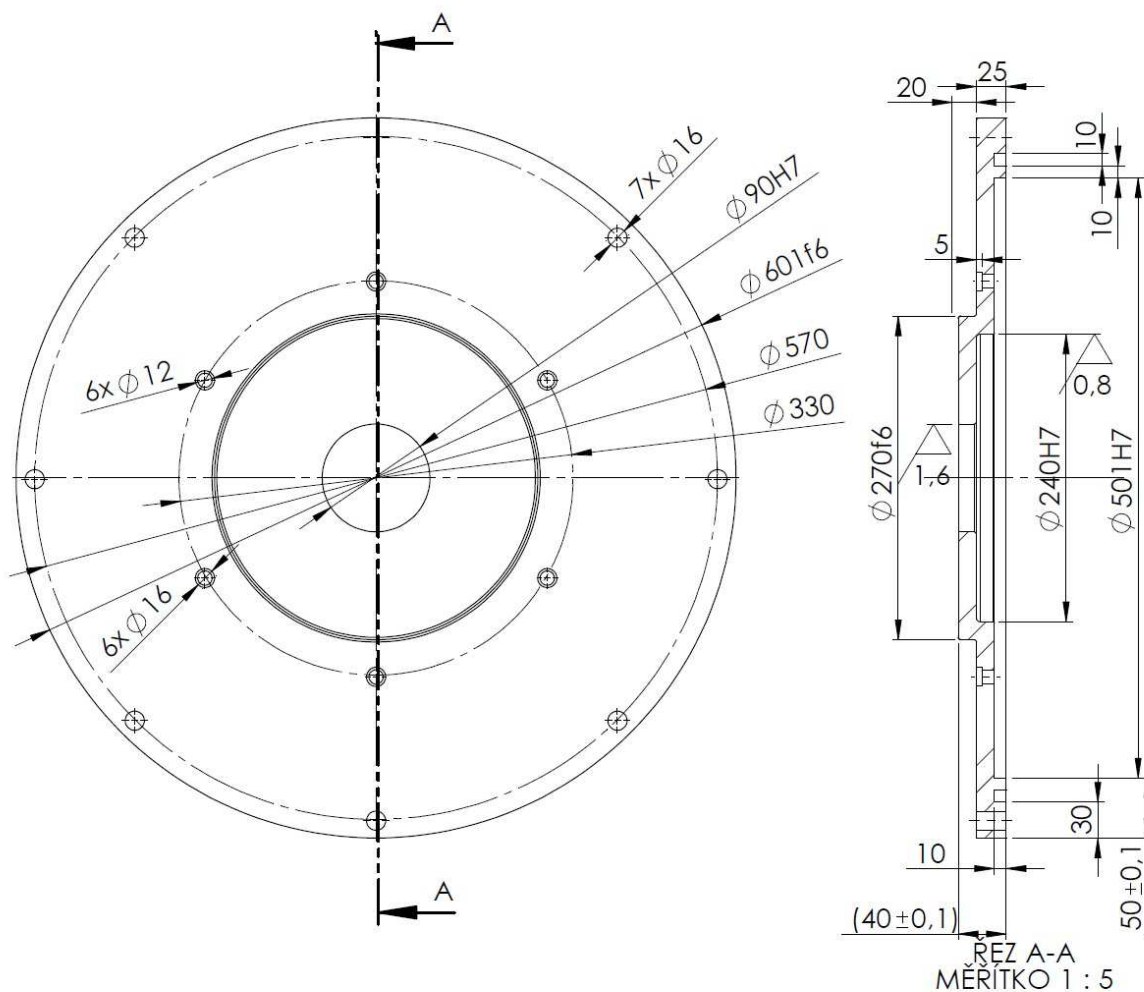
3,2/



ŘEZ A-A

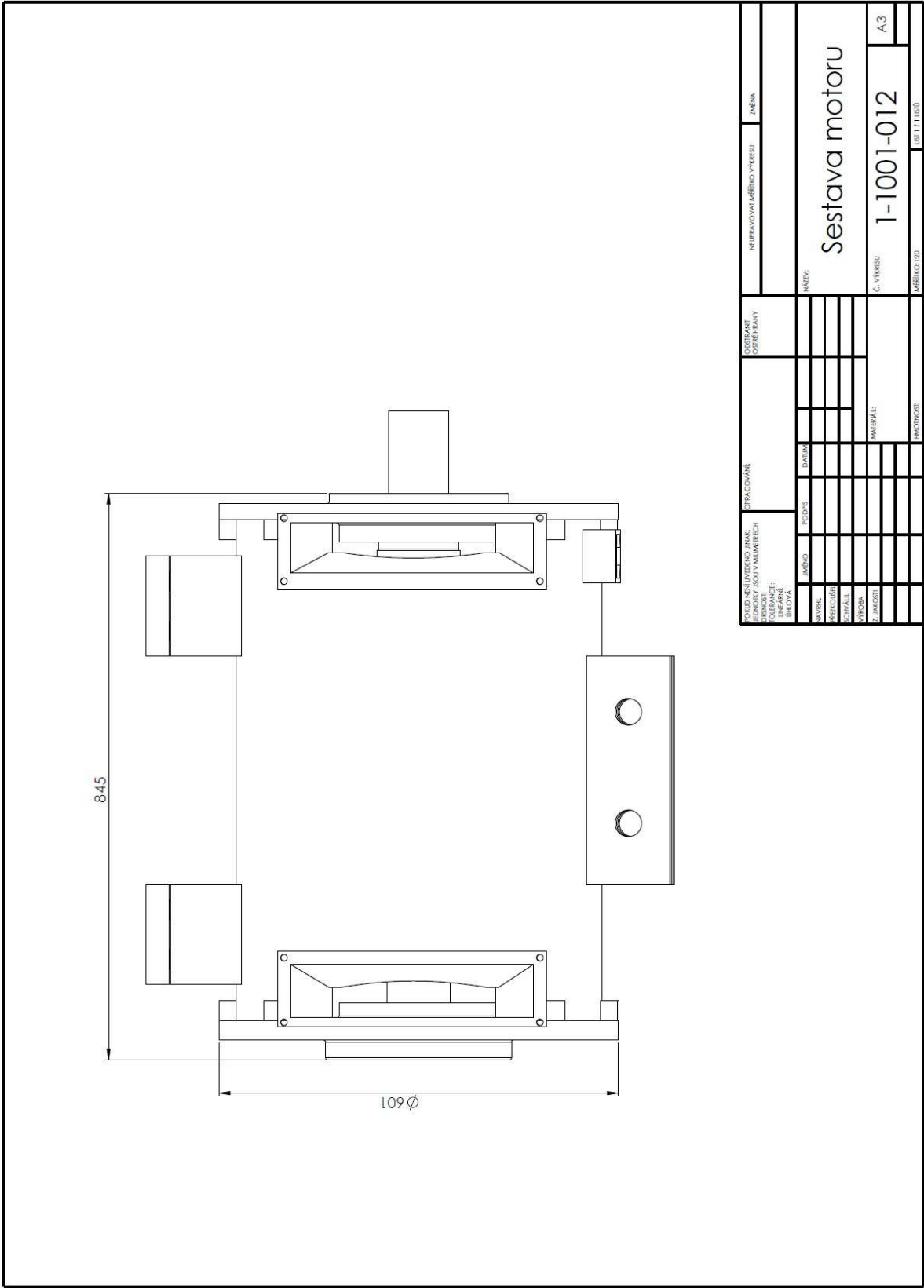
POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: ISO 2768-m LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:				OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV		PODPIS		DATUM						NÁZEV:	
NAVRHL		Adam Rýznar								Ložiskový štít - zadní	
PŘEZKOUSEL											
SCHVÁLIL											
VÝROBA											
Z. JAKOSTI						MATERIÁL:		Č. VÝKRESU		A4	
						11500		1-1001-008			
						HMOTNOST: 21,7 kg		MĚŘÍTKO: 1:5		LIST 1 Z 1 LISTŮ	

6,3



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: ISO 2768-m LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:				OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU		ZMĚNA	
	NÁZEV	PODPIS	DATUM					Přední štít			
NAVRHL	Adam Rýznar										
PŘEZKOŮŠEL											
SCHVÁLIL											
VÝROBA											
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:				Č. VÝKRESU		1-1001-009	
				11500							
										A4	
				HMOTNOST: 38,9 kg				MĚŘITKO: 1:5		LIST 1 Z 1 LISTŮ	

[illegible]

[illegible]

10 Přílohy na CD

1. Datový list plechů M330-50A
2. Výkresová dokumentace
3. Simulace v programu Ansys